

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LA CARGA GANADERA EN ECOSISTEMAS PASTORALES DE ARAGÓN MEDIANTE NDVI Y SLAVI

Autora: Esperanza Sancho Ruiz

Tutor: Fernando Pérez Cabello

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre 2021



Universidad
Zaragoza

Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio



Resumen

Los pastos constituyen un importante aprovechamiento de los montes en Aragón, aportan numerosos servicios ecosistémicos y son susceptibles a la degradación tanto por sobrepastoreo como por abandono, requiriéndose una correcta gestión de la actividad ganadera sobre los recursos pastables, con el objetivo de mantener su productividad y diversidad. Los productos de teledetección suponen una importante herramienta para el estudio de los pastos. En concreto, en este trabajo se analiza el potencial de índices espectrales de vegetación (NDVI y SLAVI), extraídos a partir de colecciones de productos Landsat (LANDSAT/LC08/C01/T1_32DAY_TOA y LANDSAT/LC08/C01/T1_08DAY_TOA), en relación con las consecuencias derivadas del diferente régimen de carga ganadera. Además, se estudia también el ciclo fenológico que presentan distintos ecosistemas pastorales a lo largo de un gradiente bioclimático en Aragón, entre el centro del valle del Ebro, la sierra de Guara, y los Pirineos. Se encuentran diferencias significativas entre los sectores de estudio, ligados a las condiciones climáticas y edáficas de los mismos; estudiando los valores de NDVI y SLAVI para cada sector se identifican diferencias entre los regímenes de pastoreo, siguiendo un patrón de valores máximos en el régimen de pastoreo bajo, y mínimos en el pastoreo alto. La variable con mayor capacidad explicativa sobre el régimen de pastoreo es el NDVI, complementándose con el índice SLAVI. Así, las series multitemporales de NDVI y SLAVI a partir de productos Landsat son sensibles a las variaciones en el régimen ganadero de los pastos, teniendo en cuenta las características e individualidades propias de cada ambiente bioclimático.

Palabras clave: pastos, Landsat, NDVI, SLAVI, fenología.

Abstract

Grasslands represent an important share of mounts in Aragon as they provide numerous ecosystem services and are susceptible to degradation both due to overgrazing and abandonment. They require a correct management of livestock activity, in order to maintain their productivity and diversity. Remote sensing tools shine when studying pastures as they help in the management tasks. In this work we analyse the potential of vegetation spectral indices (NDVI and SLAVI), that are extracted from Landsat product collections (LANDSAT / LC08 / C01 / T1_32DAY_TOA and LANDSAT / LC08 / C01 / T1_08DAY_TOA), for dealing with the impact of the different livestock regimes, and its relation with the phenological cycle that different pastoral ecosystems present along a bioclimatic gradient in Aragon (located between the center of the Ebro valley, the Sierra de Guara and the Pyrenees). There are significant differences between the studied sectors which are linked to their climatic and edaphic conditions. When studying the values of NDVI and SLAVI for each sector, several differences between grazing regimes are identified, following a pattern of maximum values in the low grazing regime, and minimum values in the high grazing regime. The variable with the greatest explanatory capacity on the grazing regime is the NDVI, together with the SLAVI index. In summary, the multitemporal series of NDVI and SLAVI from Landsat products are sensitive to variations in the livestock regime of pastures, when taking into account the characteristics and individualities of each bioclimatic environment.

Key words: grasslands, Landsat, NDVI, SLAVI, phenology.

ÍNDICE

1. Introducción.....	5
1.1. Presentación	5
1.2. Marco de trabajo.....	6
1.3. Objetivos	7
1.4. Área de estudio.....	7
2. Metodología	13
2.1. Fuentes de información y materiales.....	13
2.2. Análisis estadístico entre categorías e índices.....	18
2.3. Estudio de la fenología.....	20
3. Resultados	22
3.1. Estudio estadístico entre categorías.....	22
3.1.1. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre SECTORES	22
3.1.2. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre ZONAS	23
3.1.3. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre los REGÍMENES DE PASTOREO.	24
3.1.4. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre los REGÍMENES DE PASTOREO por SECTOR.....	25
3.1.5. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre MESES por SECTORES	28
3.1.6. Modelos predictivos y explicativos con los índices NDVI y SLAVI.....	30
3.1.7. Análisis de la relación entre los valores de NDVI y SLAVI.....	31
3.2. Evolución del ciclo fenológico.....	33
4. Conclusiones	39
5. Bibliografía	41
6. Anexos: Gráficos del ciclo fenológico para los distintos sectores.....	43

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de pastos del estudio y sus características	7
Tabla 2. Organización y nomenclatura de las parcelas estudiadas.....	14
Tabla 3. Información de las bandas que recoge el sensor OLI de Landsat-8.....	15
Tabla 4. Prueba bilateral con las agrupaciones de localizaciones con los valores de NDVI.....	23
Tabla 5. Prueba bilateral con las agrupaciones de localizaciones con los valores del índice SLAVI	23
Tabla 6. Relación de meses de mayor a menor NDVI en Mediana.....	28
Tabla 7. Relación de meses de mayor a menor SLAVI en Mediana	28
Tabla 8. Relación de meses de mayor a menor NDVI en Guara	28
Tabla 9. Relación de meses de mayor a menor SLAVI en Guara.....	28
Tabla 10. Relación de meses de mayor a menor NDVI en Pirineos.....	29
Tabla 11. Relación de meses de mayor a menor SLAVI en Pirineos.....	29
Tabla 12. Reglas resultado del árbol de regresión.....	30
Tabla 13. Reglas resultado del árbol de regresión	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de los sectores de estudio definidos por el proyecto PROPAST.....	8
Figura 2. Diagrama con los sectores de estudio definidos por el proyecto PROPAST.....	8
Figura 3. Estructura jerárquica del muestreo en Pirineos	9
Figura 4. Localización de las parcelas del sector de Mediana.....	9
Figura 5. Climograma de Mediana de Aragón.....	10
Figura 6. Localización de las parcelas del sector de Guara.....	10
Figura 7. Climograma de Used.....	11
Figura 8. Localización de las parcelas del sector de Pirineos.....	11
Figura 9. Climogramas de Hoz de Jaca y Bielsa.....	12
Figura 10. Esquema del proceso metodológico llevado a cabo en este trabajo.....	13
Figura 11. Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat-8.....	16
Figura 12. Designación para las imágenes de calidad LandsatLook de 8 bits.....	17
Figura 13. Comparación de parcelas con y sin los datos correspondientes a los meses de noviembre-febrero.....	18
Figura 14. Trayectoria ideal de los valores del índice de vegetación con múltiples periodos de crecimiento descritos usando varios modelos logísticos.....	20

Figura 15. Esquema que muestra cómo las fechas de transición se calculan usando los valores mínimos y máximos en el cambio de la curvatura.....	21
Figura 16. Gráficos de las medias de NDVI y SLAVI de cada sector	22
Figura 17. Gráficos de las medias de NDVI y SLAVI para cada zona	24
Figura 18. Gráficos de las medias de NDVI y SLAVI para cada régimen de pastoreo	25
Figura 19. Gráficos de bigotes de cada régimen de pastoreo en el sector de Mediana con los valores de NDVI y SLAVI	26
Figura 20. Gráficos de bigotes de cada régimen de pastoreo en el sector de Guara con los valores de NDVI y SLAVI	27
Figura 21. Gráficos de bigotes de cada régimen de pastoreo en el sector de Pirineos con los valores de NDVI y SLAVI	27
Figura 22. Valores medios de NDVI por meses para cada sector.....	29
Figura 23. Gráfico de dispersión de NDVI y SLAVI para cada régimen de pastoreo.....	32
Figura 24. Ciclo fenológico por sectores para los años 2014-2017.....	33
Figura 25. Ciclo fenológico por sectores para los años 2018-2020.....	33
Figura 26. Ciclo fenológico anual (2019) en el sector de Mediana para cada régimen de pastoreo.....	35
Figura 27. Ciclo fenológico anual (2019) en el sector de Guara para cada régimen de pastoreo.....	36
Figura 28. Ciclo fenológico anual (2019) en el sector de Pirineos para cada régimen de pastoreo	37
Figura 29. Ciclo fenológico anual (2019) en el sector de Pirineos para cada parcela	37

1. Introducción

1.1. Presentación

Los pastos son un tipo de uso humano de las praderas ligados a la actividad ganadera extensiva, y a escala global, ocupan aproximadamente un 40% de las tierras, y un 26% de la superficie terrestre, encontrándose en todas las regiones, a excepción de los desiertos y bosques densos. De este modo, constituyen un recurso básico para la economía de millones de personas en el mundo (FAO, 2006).

Son comunidades con una cobertura vegetal constituida principalmente por gramíneas y acompañadas de otras monocotiledóneas y dicotiledóneas herbáceas (FAO, 2016; Dixon *et al.*, 2014). El origen puede ser natural o antrópico; los primeros están determinados por las condiciones ambientales y por la fauna herbívora silvestre, los segundos se asocian a la actividad humana y a los herbívoros domésticos (Dixon *et al.*, 2014).

La distribución espacial de los pastos depende principalmente de la topografía y el clima, así como las propiedades del suelo y la forma de aprovechamiento condicionan su estructura y composición. En el caso de Aragón, la ganadería constituye un sector económico de gran importancia y los pastos suponen el aprovechamiento principal de los montes junto con la silvicultura (Caballero *et al.*, 2009).

La importancia de los sistemas pastables radica no solo en el rendimiento económico y social, sino también en los beneficios ambientales que suponen: contribuyen a la conservación de la biodiversidad y la heterogeneidad ambiental, ayudan a disminuir el riesgo de incendios y aumentan los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas (Alados y Pueyo, 2016).

Estos beneficios, tanto ambientales como económicos, requieren de una correcta gestión de la actividad ganadera sobre los recursos pastables, con el objetivo de mantener su productividad y diversidad (Alados y Pueyo, 2016). La degradación de estos recursos, difícilmente recuperables, es un problema producido tanto por el sobrepastoreo como el abandono de los pastos.

El sobrepastoreo puede conllevar la degradación del suelo, a causa de la pérdida de cobertura vegetal por una carga ganadera excesiva, y afecta principalmente a las áreas semiáridas desertificadas (Pueyo *et al.*, 2009).

En cuanto al abandono o infrautilización de los pastos, ligados a factores como la reducción de la actividad ganadera y de la población rural, o el cambio climático (Alados *et al.*, 2014), desemboca en procesos de matorralización, los cuales constituyen un problema principalmente en los pastos montanos y subalpinos, y cuyos efectos son difícilmente reversibles (Gartzia *et al.*, 2014).

Debido a la importancia de los pastos por los servicios ecosistémicos que aportan, y a los riesgos que se enfrentan en los últimos tiempos, se han desarrollado proyectos de investigación sobre la temática de los ecosistemas pastorales, tales como el proyecto PROPAST, en cuya línea de análisis se inserta este Trabajo Fin de Máster. Así pues, partiendo de la necesidad de estudiar los efectos del pastoreo sobre los pastos, en función

de la carga ganadera que se ejerce sobre los mismos, y de las características de los pastos, se plantea la utilidad del empleo de productos de teledetección como una herramienta para el estudio de los pastos, resultando complementario a investigaciones realizadas en campo y laboratorio.

Con el objetivo de poder realizar un análisis temporal relativamente amplio, se ha optado por el empleo de productos de la serie Landsat de la NASA y el USGS, en concreto del satélite Landsat-8, y el cual recoge información espectral mediante los sensores OLI y TIRS, desde su lanzamiento en febrero de 2013 hasta la actualidad (USGS, 2021).

Como herramienta para el análisis y comparación de la vegetación entre sectores y distintos regímenes de pastoreo se han empleado índices de vegetación, los cuales tratan de realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar otras cubiertas, empleando para ello combinaciones de distintas bandas espectrales (Eastman et al., 2013). Así pues, se han empleado los índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y SLAVI (*Specific Leaf Area Vegetation*), como indicadores de los cambios que la carga ganadera supone sobre distintos tipos de pastos: pasto ralo, montano y subalpino.

Estos tipos de pastos se ubican en grupos de parcelas (zonas) en tres sectores, dispuestos a lo largo de un transecto entre el sector central del valle del Ebro y los Pirineos, siguiendo un gradiente ambiental determinado por la precipitación anual y que abarca desde pastos semiáridos hasta subalpinos.

Así pues, se ha realizado un análisis estadístico con los valores de ambos índices de vegetación para los distintos sectores, zonas y regímenes de pastoreo, así como un estudio del ciclo fenológico de la vegetación; estudiar la fenología resulta interesante ya que supone un indicador clave frente a numerosas variables, tales como el cambio climático (Eastman *et al.*, 2013) o, en este caso concreto, la actividad extensiva ganadera.

1.2. Marco de trabajo

Este trabajo parte de la línea de investigación del proyecto de investigación CGL2016-80783-R, PROPAST: *Papel de las interacciones planta-suelo en el mantenimiento de la productividad y la diversidad de ecosistemas pastorales*.

Sobre la base de la relevancia de los pastos y el pastoreo, y la necesidad de llevar a cabo una correcta gestión de los recursos pastables, el proyecto busca evaluar la importancia y posible aplicación a la gestión de los diversos mecanismos relativos a las interacciones ganado-planta-suelo (interacción pasto-herbívoro mediante el efecto del ganado en las interacciones planta-suelo), con el objetivo de fomentar que los procesos del subsuelo sean incluidos en la gestión de los pastos (Alados y Pueyo, 2016).

1.3. Objetivos

Partiendo del contexto del proyecto PROPAST, para establecer los objetivos de este trabajo se tiene en cuenta que el objetivo principal del proyecto es “evaluar la importancia de las interacciones planta-suelo en el mantenimiento de la productividad y la diversidad de ecosistemas pastorales, así como investigar el papel de dichas interacciones en la gestión de los pastos y la restauración de ecosistemas pastorales degradados” (Alados y Pueyo, 2016). Así pues, el proyecto PROPAST parte de la hipótesis de que el pastoreo, sometido a una correcta gestión ganadera, influye de forma positiva en las propiedades del suelo y la actividad del pasto, teniendo en cuenta que el efecto en pastos de ambientes semiáridos difiere con respecto a pastos de ambientes subalpinos.

El objetivo principal del trabajo es analizar la distribución de los valores de dos índices espectrales de vegetación (NDVI y SLAVI) en función de diferentes regímenes de carga ganadera, a lo largo de un gradiente bioclimático en Aragón. A su vez, este objetivo se articula en una serie de objetivos específicos:

- Analizar el efecto de la carga ganadera sobre los pastos, en ambientes sometidos a distinto estrés hídrico, a lo largo del transecto entre el centro del valle del Ebro y los Pirineos.
- Estudiar la efectividad de productos Landsat, concretamente las colecciones de Landsat-8 LANDSAT/LC08/C01/T1_32DAY_TOA y LANDSAT/LC08/C01/T1_08DAY_TOA, y centrándonos en los índices NDVI y SLAVI como herramientas para analizar las diferencias producidas por la distinta carga ganadera sobre diferentes ecosistemas pascícolas.
- Describir el ciclo fenológico en los tres ambientes biogeográficos, a partir de la serie Landsat, en el periodo comprendido entre 2014 y 2020.

En este sentido, este trabajo se concibe bajo la hipótesis de que las series multitemporales de índices espectrales de vegetación (NDVI y SLAVI), extraídos de productos Landsat, son sensibles a las consecuencias derivadas del diferente régimen de carga ganadera que presentan los ecosistemas pastorales.

1.4. Área de estudio

El área de estudio comprende tres sectores localizados entre el centro del valle del Ebro y el Pirineo oscense, pasando por la Sierra de Guara, a lo largo de un gradiente ambiental decreciente de estrés hídrico, determinado por la precipitación anual y ligado a la altitud.

Cada uno de estos sectores (Pirineos, Guara y Mediana) se corresponde con un tipo de pasto: pasto ralo en el centro del valle del Ebro, pastos montanos en la Sierra de Guara y pastos subalpinos en el Pirineo; cuyas características principales se muestran en la *Tabla 1*.

Tipo de pasto	Especies	Cobertura vegetal	Precipitación anual	Localización
Pasto ralo	<i>Salsoa vermiculata</i> , <i>Artemisa herba-alta</i> y <i>Lygeum spartum</i>	45% (escasa)	300 mm	Valle del Ebro (Mediana)
Pastos montanos	Especies de géneros <i>Aphyllanthes</i> , <i>Carex</i> y <i>Festuca</i> , <i>Brachypodium pinnatum</i> y <i>Buxus sempervirens</i> con <i>Quercus faginea</i>	95% (alta)	1000 mm	Sierra de Guara
Pastos subalpinos	Especies de los géneros <i>Festuca</i> , <i>Carex</i> , <i>Plantago</i> y <i>Trifolium</i>	100% (total)	1600 mm	Pirineo

Tabla. 1. Tipos de pastos del estudio y sus características. Fuente: tabla elaborada a partir de los datos del proyecto PROPAST.

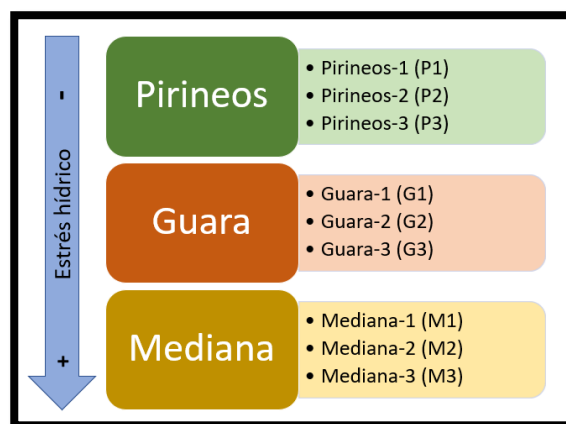
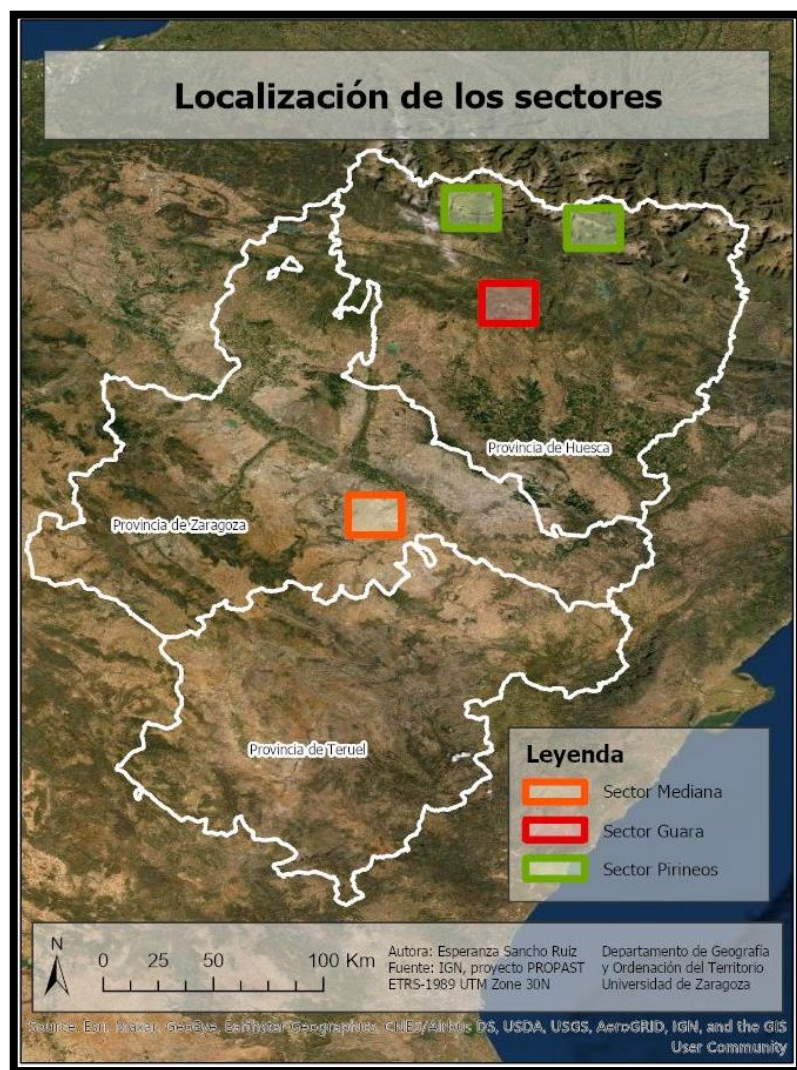


Figura 1 y 2. Localización de los sectores de estudio y diagrama con los sectores definidos en el proyecto PROPAST.

Los **sectores**, cuya localización en el contexto de la Comunidad Autónoma de Aragón puede verse en la *Figura 1*, se dividen en tres **zonas** de estudio cada uno, que se identifican del siguiente modo: Pirineos-1 (P1), Pirineos-2 (P2), Pirineos-3 (P3), Guara - 1 (G1), Guara-2 (G2), Guara-3 (G3), Mediana-1 (M1), Mediana-2 (M2) y Mediana-3 (M3), como se muestra en el diagrama de la *Figura 2*.

A su vez, cada una de las zonas incluye tres **parcelas**, categorizadas en función de la carga ganadera que soportan. Estas categorías han sido establecidas por el proyecto PROPAST, estableciendo un gradiente de pastoreo desde el punto de agua o establo, donde encontramos una mayor presión de pastoreo, hasta una zona próxima en la que apenas se desarrolle ni se haya desarrollado en el pasado la actividad de pastoreo (Alados y Pueyo, 2016). Así pues, cada zona cuenta con una parcela de nivel de pastoreo alto, medio y bajo, lo que hace un total de 27 parcelas, nueve parcelas por sector, siendo tres de cada régimen de pastoreo. En la *Figura 3* se incluye a modo de ejemplo la estructura jerárquica del muestreo, con la relación entre sectores, zonas y parcelas en Pirineos, siguiéndose la misma estructura en Guara y Mediana.

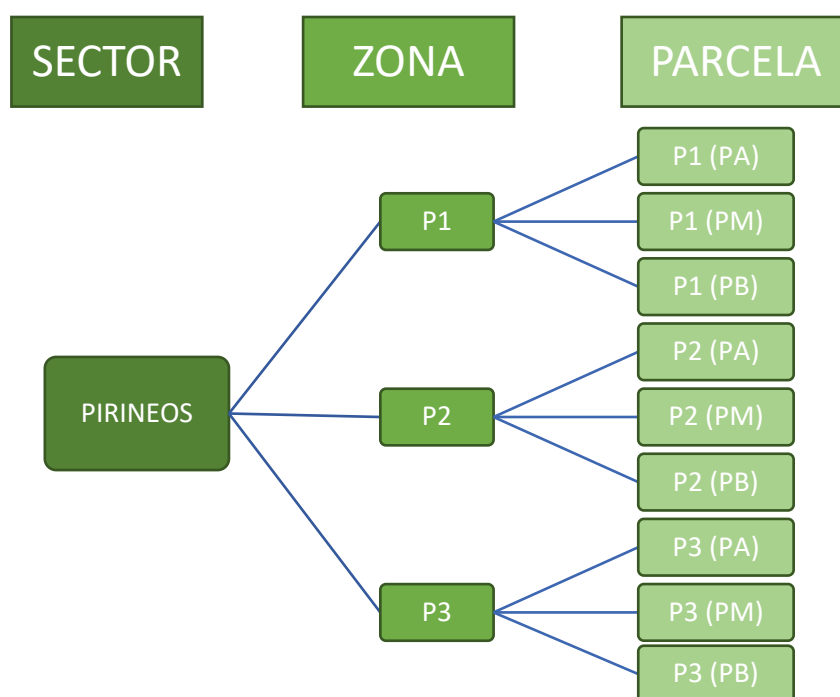


Figura 3. Estructura jerárquica del muestreo en Pirineos.

Comenzamos con el sector de Mediana, localizado en el área central del Valle del Ebro, en la Provincia de Zaragoza, al sureste de la capital. Las tres zonas que lo componen se ubican, como se muestra en la *Figura 3*, en los montes esteparios al oeste y sur de Medina de Aragón, y corresponden con pastos ralos. Se trata de pastos compuestos por *Salsoa vermiculata*, *Artemisa herba-alta* y *Lygeum spartu*, con una escasa cobertura vegetal, del 45%.

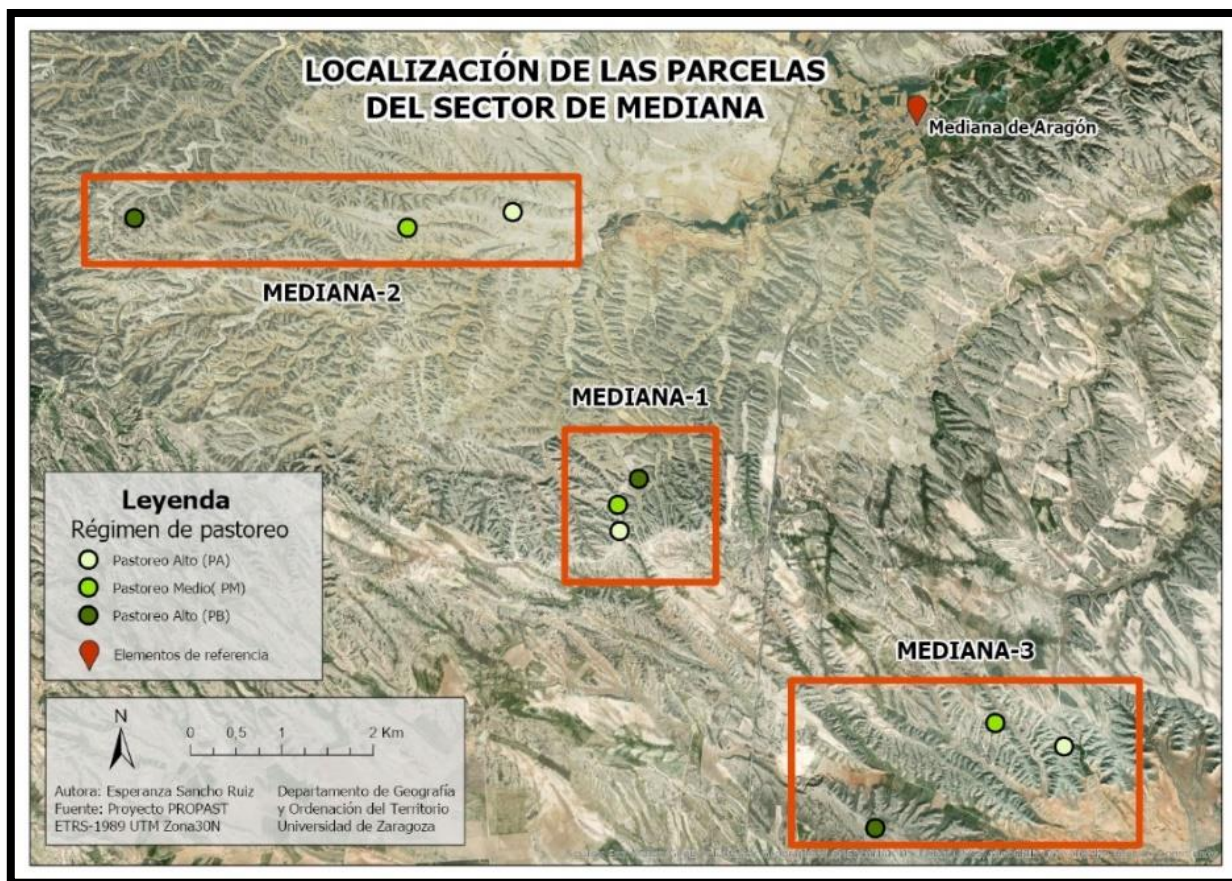


Figura 4. Localización de las parcelas del sector de Mediana. Fuente: elaboración a partir de datos del proyecto PROPAST.

Este sector corresponde con un clima semiárido, BSk en la clasificación de Köppen-Geiger, con una precipitación anual media en torno a los 300 mm, destacando la aridez de los meses estivales, en los que las temperaturas superan notablemente a las precipitaciones.

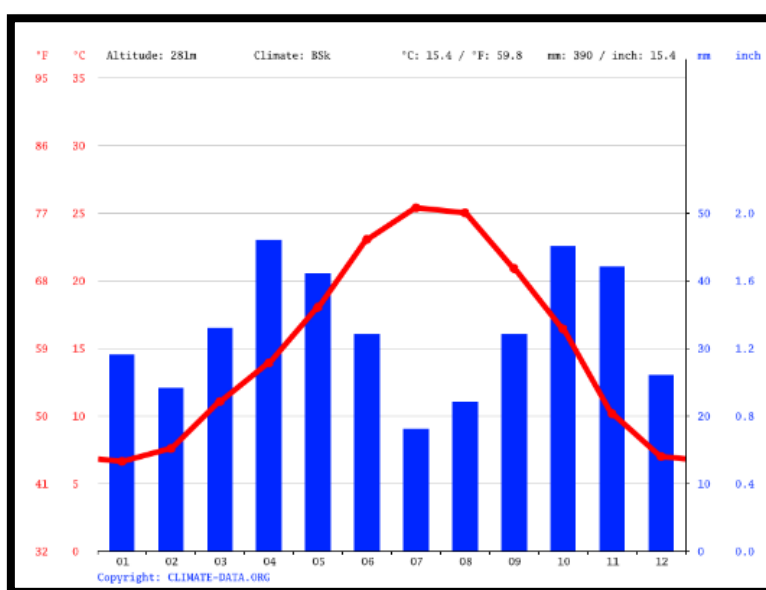


Figura 5. Climograma de Mediana de Aragón. Fuente: www.climate-data.org

El sector de pasto montano se ubica en la Sierra de Guara, en la comarca del Alto Gállego, al sur del pueblo Used/Usé (Provincia de Huesca). Las tres zonas de este sector (Figura 6) las componen pastos compuestos por especies de géneros *Aphyllanthes*, *Carex* y *Festuca*, *Brachypodium pinnatum* y *Buxus sempervirens* con *Quercus faginea*, con una cobertura vegetal alta, del 95% y con una precipitación anual de casi 1000mm. Corresponde con un clima Cfb según la clasificación de Köppen y Geiger.

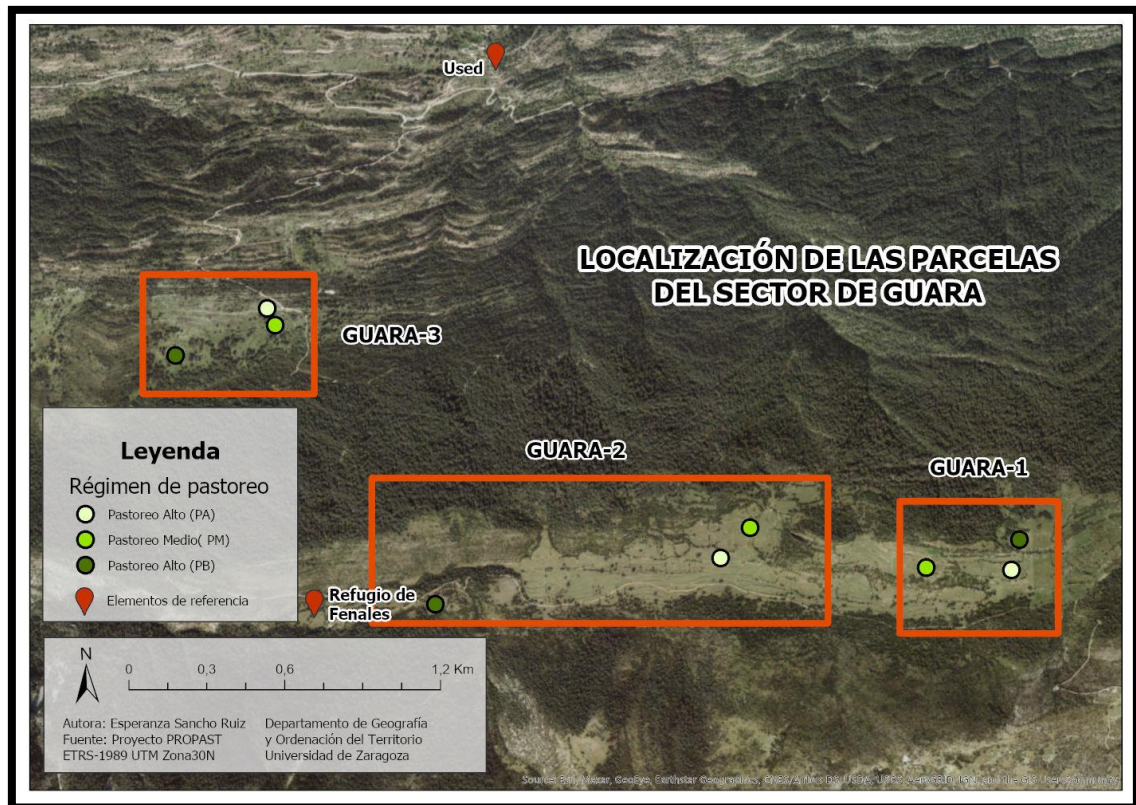


Figura 6. Localización de las parcelas del sector de Guara.

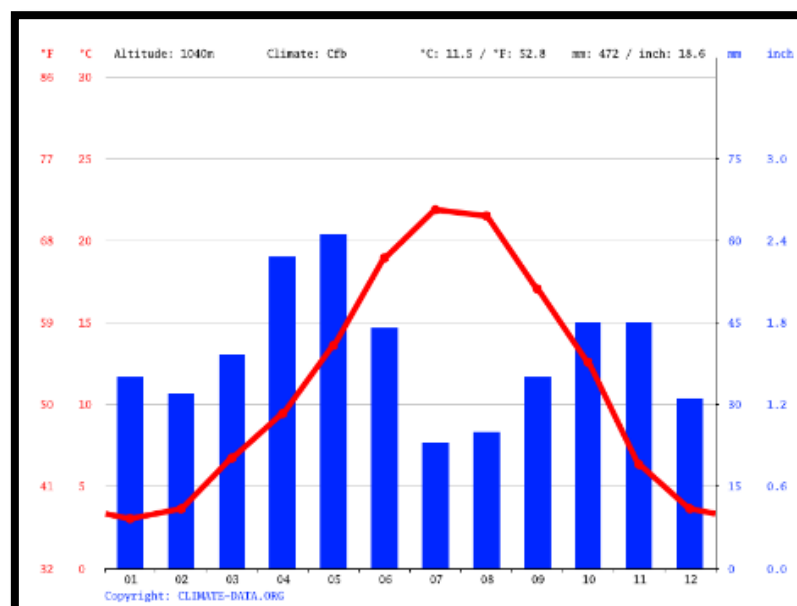


Figura 7. Climograma de Used. Fuente: climate-data.org

Los pastos subalpinos los encontramos en el Pirineo oscense, con dos de las zonas, Pirineos-2 y Pirineos-3 ubicadas en el entorno del Ibón de Piedrafita, en el municipio de Biescas (comarca del Alto Gállego). Pirineos-1, en cambio, se encuentra al norte de la localidad de Revilla, en el municipio de Tella-Sin (comarca del Sobrarbe), tal y como podemos constatar en la *Figura 8*.

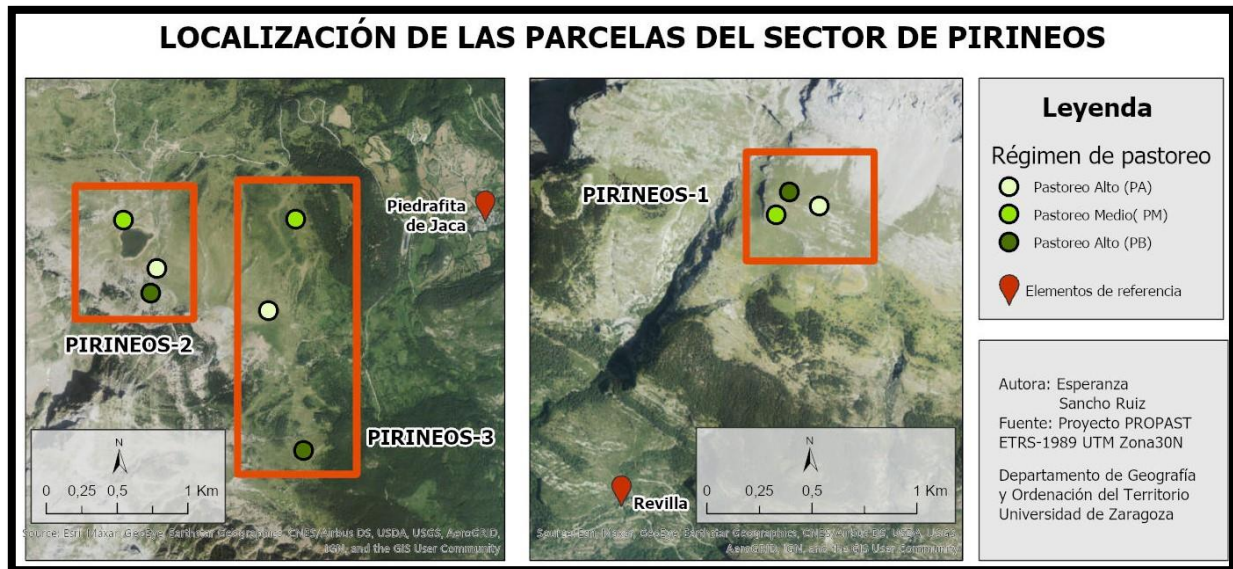
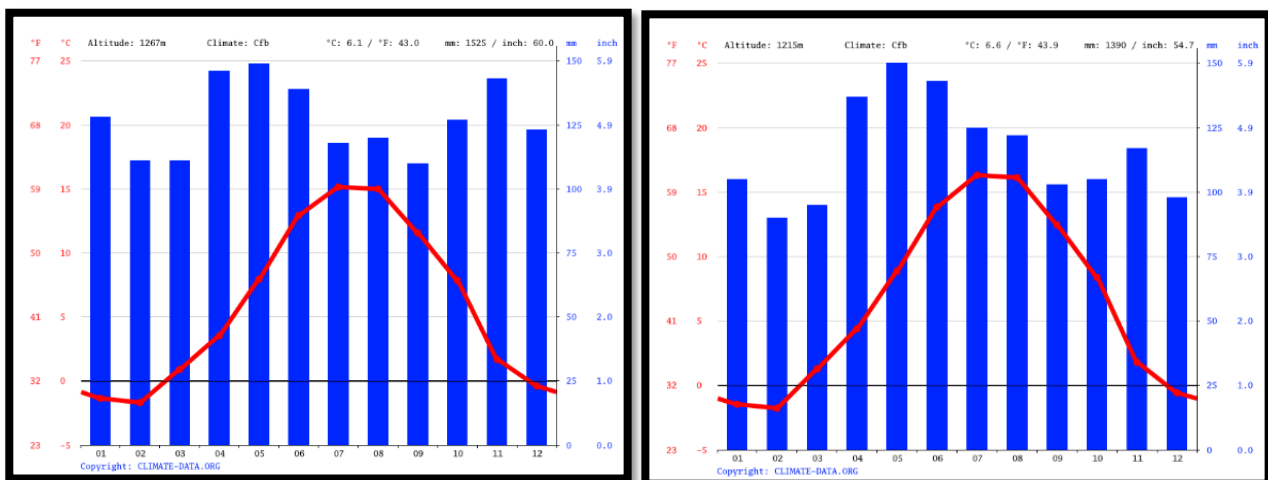


Figura 8. Localización de las parcelas del sector de Pirineos.

Se trata de prados dominados por especies de los géneros *Festuca*, *Carex*, *Plantago* y *Trifolium*, con una cobertura vegetal total, del 100% y una precipitación anual que ronda los 1600mm. Debido a la distancia entre las zonas, se incluyen dos climogramas, uno de Hoz de Jaca (*Figura 9.a.*), que corresponde con Pirineos-2 y Pirineos-3, y otro de Bielsa, para Pirineos-1 (*Figura 9.b.*), constatando la similitud entre los regímenes de ambas localizaciones. Corresponden ambos con un clima Cfb según la clasificación de Köppen y Geiger.



2. Metodología

El proceso metodológico llevado a cabo en la realización de este trabajo se detalla en este apartado, organizado en una serie de apartados que incluyen las tareas desarrolladas. A continuación, se incluye un gráfico (*Figura 10*) con dichos apartados, a modo de esquema introductorio.

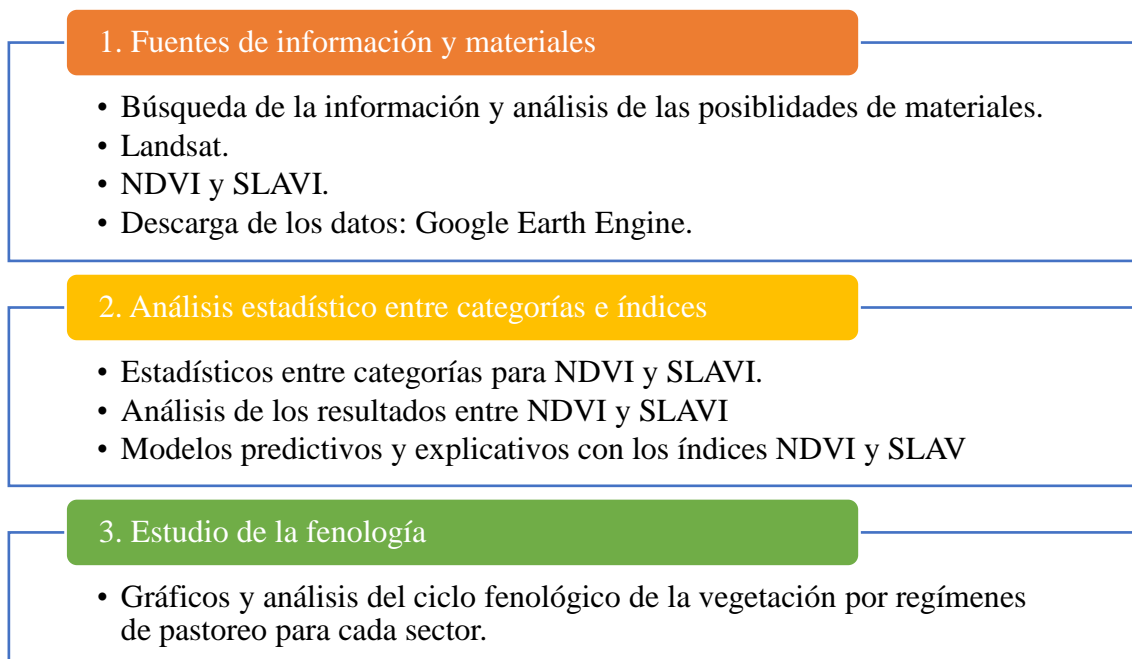


Figura 10. Esquema del proceso metodológico llevado a cabo en este trabajo.

2.1. Fuentes de información y materiales

En primer lugar, se ha llevado a cabo una búsqueda de información sobre el tema, así como un análisis de las posibilidades de materiales a emplear para llevar a cabo los objetivos propuestos. De este modo, se ha realizado una aproximación y recogida de información bibliográfica sobre el entorno de localización de las parcelas, así como del proyecto.

En cuanto al régimen de pastoreo en las parcelas (si se trata de un régimen de pastoreo alto, medio o bajo), este viene determinado por el proyecto PROPAST: la intensidad del pastoreo fue establecida contando las heces en cuadros de 5x5 en 3 bloques en cada punto de muestreo, 5 réplicas por bloque (4 zonas x 3 niveles de pastoreo x3 bloques x 5 réplicas por bloque). Además, se realizó una prospección edáfica, litológica y topográfica, buscando una homogeneidad entre las parcelas (Alados y Pueyo, 2016).

La información sobre dichas parcelas se encontraba en diferentes formatos, por lo que se ha unificado en una única base de datos SIG, mediante el software *ArcGis Pro*, lo cual ha permitido una mejor organización, así como el análisis espacial de la información. En la *Tabla 2* se recogen ordenadas todas las parcelas con el régimen de pastoreo que se lleva a cabo en ellas, los grupos en los que se organizan (zonas) y el sector al que pertenecen, con el objetivo de aclarar la nomenclatura empleada a lo largo del trabajo.

SECTOR	ZONA	PARCELAS	
		REGIMEN DE PASTOREO	NOMENCLATURA
Mediana (M)	Mediana 1 (M1)	Bajo	M1-PB
		Medio	M1-PM
		Alto	M1-PA
	Mediana 2 (M2)	Bajo	M2-PB
		Medio	M2-PM
		Alto	M2-PA
	Mediana 3 (M3)	Bajo	M3-PB
		Medio	M3-PM
		Alto	M3-PA
Guara (G)	Guara 1 (G1)	Bajo	G1-PB
		Medio	G1-PM
		Alto	G1-PA
	Guara 2 (G2)	Bajo	G2-PB
		Medio	G2-PM
		Alto	G2-PA
	Guara 3 (G3)	Bajo	G3-PB
		Medio	G3-PM
		Alto	G3-PA
Pirineos (P)	Pirineos 1 (P1)	Bajo	P1-PB
		Medio	P1-PM
		Alto	P1-PA
	Pirineos 2 (P2)	Bajo	P2-PB
		Medio	P2-PM
		Alto	P2-PA
	Pirineos 3 (P3)	Bajo	P3-PB
		Medio	P3-PM
		Alto	P3-PA

Tabla 2. Organización y nomenclatura de las parcelas estudiadas.

Para llevar a cabo este trabajo se ha optado por el empleo de productos del satélite Landsat-8, de la serie Landsat de la NASA y el USGS. Landsat-8 toma imágenes de la Tierra siguiendo una órbita casi polar heliosincrónica, a una altitud de 705 km, inclinada a 98°2', y completa una órbita terrestre cada 99 minutos. El ciclo de revisita es de cada 16 días, pasando sobre el ecuador a las 10:00 a.m. (+/-15 minutos). Este satélite adquiere alrededor de 740 imágenes diarias, las cuales se toman con una franja de superposición entre el 7% en el ecuador hasta el 85% en las altas latitudes aproximadamente. El tamaño de las imágenes es de 185 km x 180 km (USGS, 2021).

En cuanto a los instrumentos de Landsat-8, porta sensores OLI (*Operational Land Imager*) y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). OLI recoge información espectral en 9 bandas, incluyendo una banda del pancromático, capturando datos con una precisión radiométrica de 12 bits, una mejora frente a los 8 bits de los sensores de los satélites Landsat 1-7 (USGS, 2021). A continuación, se incluye la *Tabla 3*, con la relación de bandas de Landsat-8 y la longitud de onda en las que recogen información espectral, así como el tamaño del píxel para cada una y su denominación en inglés; y la figura x, en la que se muestra de forma gráfica el ancho de banda de los sensores OLI y TIRS en Landsat-8, en comparación con ETM+ de Landsat-7.

BANDAS	TAMAÑO DEL PÍXEL	LONGITUD DE ONDA	DESCRIPCIÓN
B1	30 metros	0.43 - 0.45 μm	<i>Coastal aerosol</i>
B2	30 metros	0.45 - 0.51 μm	<i>Blue</i>
B3	30 metros	0.53 - 0.59 μm	<i>Green</i>
B4	30 metros	0.64 - 0.67 μm	<i>Red</i>
B5	30 metros	0.85 - 0.88 μm	<i>Near infrared</i>
B6	30 metros	1.57 - 1.65 μm	<i>Shortwave infrared 1 (SWIR-1)</i>
B7	30 metros	2.11 - 2.29 μm	<i>Shortwave infrared 2</i>
B8	15 metros	0.52 - 0.90 μm	<i>Panchromatic</i>
B9	15 metros	1.36 - 1.38 μm	<i>Cirrus</i>
B10	30 metros	10.60 - 11.19 μm	<i>Thermal infrared 1</i>
B11	30 metros	11.50 - 12.51 μm	<i>Thermal infrared 2</i>
BQA	30 metros	-	<i>Coll. 1 QA Bitmask</i>

Tabla 3. Información de las bandas que recoge OLI, Landsat-8. Fuente: USGS, 2021.

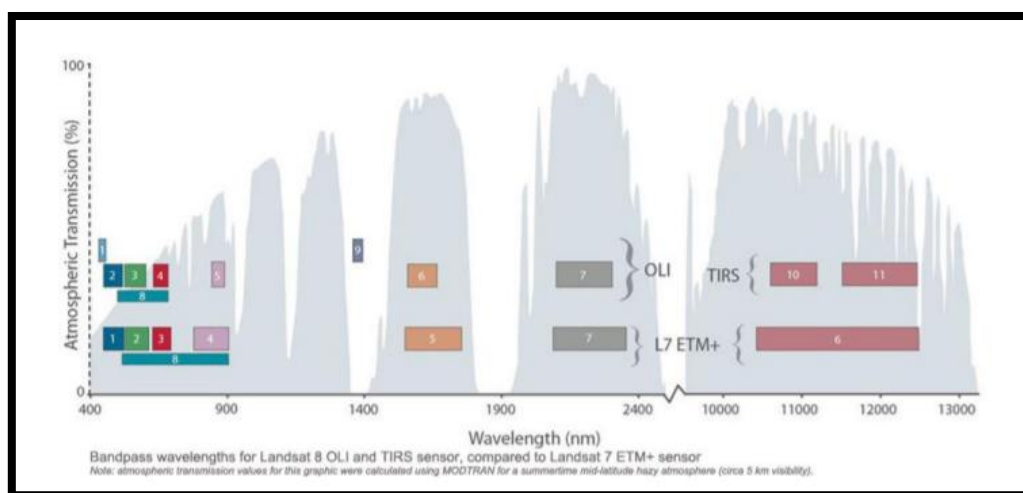


Figura 11. Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat-8 y ETM+ en Landsat 7. Fuente: USGS, 2021.

Landsat-8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013, y continúa tomando imágenes en la actualidad, tratándose del satélite de la serie Landsat más reciente (USGS, 2021). De este modo, se ha establecido como marco temporal para este estudio el intervalo de años entre el 1 de enero de 2014 y el 12 de diciembre de 2020, con el objetivo de tener información completa para todos los meses en los años seleccionados.

Para la descarga de los productos de teledetección se ha empleado *Google Earth Engine*, una plataforma SIG desarrollada por Google y basada en la nube, cuya funcionalidad es visualizar y analizar imágenes satelitales del planeta (*Google Earth Engine*, 2021); en concreto, se ha empleado *Google Earth Engine Explorer* (EE Explorer), desde donde se puede acceder a una gran cantidad de conjuntos de datos y colecciones, incorporando además capas SIG.

De este modo, se han empleado los datos de las colecciones LANDSAT/LC08/C01/T1_32DAY_TOA y LANDSAT/LC08/C01/T1_08DAY_TOA; la terminología de estas colecciones se explica a continuación:

- LC08: el satélite y el sensor, Landsat-8, Operational Land Imager (OLI).
- C01: *Collection* 1, producido por el USGS hasta el 01-01-2022, mantenido por Earth Engine hasta 01-01-2023.
- T1: *Tier* 1, datos que cumplen con los requisitos de calidad geométricos y radiométricos.
- 32DAY: estos compuestos se crean a partir de todas las escenas en cada período de 32 días comenzando desde el primer día del año y continuando hasta el día 352. La última composición del año, que comienza el año 353, se superpone a la primera composición del año siguiente en 20 días. Todas las imágenes de cada período de 32 días se incluyen en el compuesto, con el píxel más reciente como valor compuesto.
- TOA: imágenes con corrección atmosférica TOA (*top-of-atmosphere*).

Tras una primera comprobación visual de las imágenes de estas colecciones sobre las parcelas, se ha optado por emplear una máscara, ya que muchas imágenes incluían una gran cantidad de nubes. La máscara aplicada se basa en la banda QA de Landsat-8 (Quality Assessment Band), la cual provee información útil para optimizar los valores de los píxeles como un indicador de ciertas condiciones. Así, la máscara aplicada elimina los valores por oclusión del terreno, saturación radiométrica, nubes y sombras de nubes (USGS, 2021). Se ha optado por no aplicar la máscara sobre los valores de nieve en este caso, ya que se ha priorizado mantener una mayor densidad de datos (teniéndolos en cuenta como datos provenientes de valores de nieve) para poder analizar mejor el ciclo anual, ya que al aplicarla disminuía en gran medida la legibilidad de los gráficos obtenidos.

Landsat Collection 1 LandsatLook 8-bit Quality Images Designations						
Landsat 8 OLI/TIRS		Landsat 7 ETM+, Landsat 4-5 TM		Landsat 1-5 MSS		Color
Bit	Description	Bit	Description	Bit	Description	
0	Designated Fill	0	Designated Fill	0	Designated Fill	
1	Terrain Occlusion	1	Dropped Pixel	1	Dropped Pixel	
2	Radiometric Saturation	2	Radiometric Saturation	2	Radiometric Saturation	
3	Cloud	3	Cloud	3	Cloud	
4	Cloud Shadow	4	Cloud Shadow	4	Unused	
5	Snow/Ice	5	Snow/Ice	5	Unused	
6	Cirrus	6	Unused	6	Unused	
7	Unused	7	Unused	7	Unused	Unused

Figura 12. Designación para las imágenes de calidad LandsatLook de 8 bits. Fuente: USGS, 2021.

A partir de los datos de esta colección, se han calculado índices de vegetación, los cuales tratan de realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar otras cubiertas, empleando para ello combinaciones de distintas bandas espectrales. Dichos índices han sido el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y el índice SLAVI (*Specific Leaf Area Vegetation*), también mediante la plataforma de *Google Earth Engine*.

El índice NDVI, o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada se calcula a partir de medidas de la reflectividad en las longitudes de onda del rojo y el infrarrojo (Eastman et al., 2013), que en Landsat-8 corresponden con las bandas 4 y 5 respectivamente, y se trata del índice de vegetación más utilizado. A continuación, se incluye la fórmula empleada para calcular este índice:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad NDVI = \frac{B5-B4}{B5+B4}$$

El índice SLAVI, o Vegetación Específica del Área Foliar es un índice directamente relacionado con el área específica de la hoja (Specific Leaf Area -SLA-), la medida del área de las hojas por una cara, dividido por el peso seco de las hojas, que a su vez está íntimamente relacionado con las propiedades eco-fisiológicas y bioquímicas de las plantas. En este sentido, bajos valores de SLAVI identifican bajas concentraciones de clorofila y xantofila, así como la presencia de celulosa y lignina en las paredes celulares. Este índice se calcula a partir de las medidas del infrarrojo, el rojo y el infrarrojo de onda

corta (SWIR), que en el Landsat-8 corresponden con las bandas 5, 4 y 7 respectivamente, como se indica a continuación, en la fórmula empleada para calcular este índice:

$$SLAVI = \frac{NIR}{(RED+SWIR2)} \quad SLAVI = \frac{B5}{B4+B7}$$

2.2. Análisis estadístico entre categorías e índices

Una vez completada la base de datos con los valores de los índices NDVI y SLAVI para cada parcela en el periodo de tiempo entre 2014 y 2020 se ha procedido a realizar un análisis estadístico de estos datos, con el objetivo de estudiar si existen diferencias en los valores de NDVI y SLAVI para cada sector y régimen de pastoreo. También se han comparado dichos índices en su capacidad para representar estas diferencias, empleando para ello análisis de varianza (ANOVAS) y Kruskal-Wallis, y se han calculado estadísticos descriptivos básicos para cada índice de vegetación.

Para la realización del análisis estadístico, y con el objetivo de poder comparar los datos entre sectores se ha optado por eliminar los datos correspondientes con los meses de noviembre a febrero, ya que los valores de nieve en Guara y principalmente en Pirineos, se concentraban en dichos meses y podían afectar a los resultados. Se ha optado en este caso por eliminar los meses en lugar de aplicar una máscara sobre la base de datos, debido a que aplicando la máscara se eliminaban tantos valores de Pirineos, que el resultado era casi equivalente a eliminar los valores de estos meses directamente, y como el objetivo es realizar comparaciones, se ha optado por trabajar solo con los meses en los que contamos información para todos los sectores. En la *Figura 13* se observa la diferencia entre los resultados con los datos de invierno (*Figura 13.a.*) y sin los datos de invierno (*Figura 13.b.*).

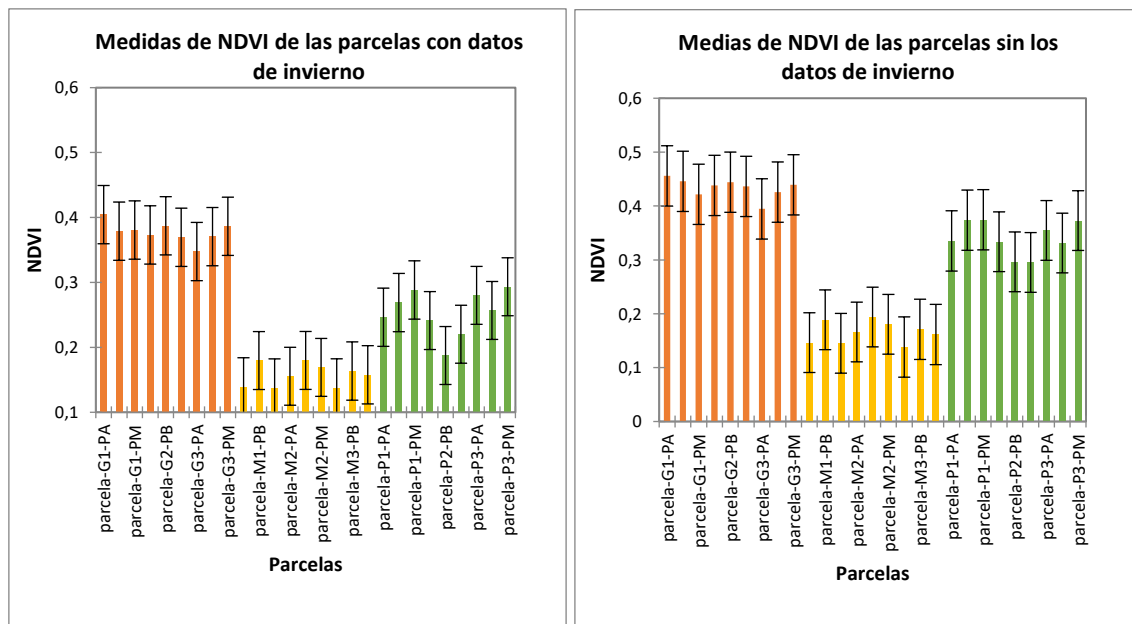


Figura 13 a y b. Comparación de parcelas con y sin los datos correspondientes a los meses de noviembre-febrero.

El análisis estadístico se ha llevado a cabo mediante XLSTAT, un complemento de análisis de datos para Excel dedicado a analizar, personalizar y compartir resultados en Microsoft Excel (XLSTAT, 2021).

En primer lugar, se ha estudiado la homogeneidad de las varianzas empleando el Test de Levene, y la distribución de los datos, ya que para realizar un análisis estadístico ANOVAS es necesario una distribución normal de los datos y varianzas homogéneas. Así pues, se han realizado test de normalidad, que han resultado en que los datos no son normales. Se ha tratado de normalizar los datos calculando la raíz y el cuadrado de los datos, lo cual no ha dado resultado.

De este modo, teniendo en cuenta que la distribución de los datos no es normal, se ha procedido a analizar los datos mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. El objetivo de realizar este análisis estadístico ha sido dar respuesta a una serie de aspectos: en primer lugar, si existen diferencias significativas entre los sectores de estudio, para cada índice. Por otro lado, analizar las diferencias entre los regímenes de pastoreo, en general y para cada índice; y principalmente estudiar si existen diferencias significativas entre los regímenes de pastoreo para cada sector individualmente; También se ha comparado la situación entre parcelas, así como su evolución temporal.

Se ha realizado un análisis estadístico de árbol de clasificación y regresión, con el objetivo de crear un modelo explicativo y predictivo para la variable dependiente (el régimen de pastoreo) en base a las variables explicativas NDVI y SLAVI. Mediante un aprendizaje inductivo, se intentan identificar los mecanismos que permiten inferir su pertenencia a cada régimen. En este caso se ha utilizado el algoritmo de árbol CHAID (*Chi-square automatic interaction detector*) que permite la detección automática de interacciones mediante *Chi-cuadrado*. El algoritmo CHAID identifica las variables que permiten dividir mejor los tipos de carga ganadera. Se comprueba si los predictores permiten distinguir regímenes de carga y cuál es su protagonismo. Además, mediante un sistema de validación (validación cruzada o validación por división muestra) se puede evaluar la bondad de la estructura. Se trata en definitiva de obtener patrones para averiguar el grado de similitud/diferencias entre cargas ganaderas. Su identificación permitiría confirmar la eficacia de las variables espectrales (índices) y la posibilidad de utilizarlo como mecanismo para identificar regímenes en otras zonas.

Por último, se han comparado las diferencias de los resultados entre los dos índices, NDVI y SLAVI, con el objetivo de valorar su utilidad para el estudio del impacto de la carga ganadera sobre los ecosistemas pascícolas. Esta comparación se ha llevado a cabo mediante un análisis de regresión, un proceso estadístico empleado para estimar las relaciones entre variables.

2.3. Estudio de la fenología

En último lugar, se ha procedido a realizar un estudio del ciclo fenológico de la vegetación, atendiendo tanto al sector de estudio (Mediana, Guara, Pirineos) como al régimen de pastoreo de las parcelas. Así pues, si cada sector cuenta con tres parcelas de cada régimen de pastoreo, se ha calculado la media de estas, con el objetivo de poder comparar la evolución y valores de la fenología de la vegetación de los pastos entre regímenes de pastoreo para cada sector.

Todo ello también se ha llevado a cabo mediante la plataforma *Google Earth Engine*, empleando la colección de Landsat-8 con los compuestos TOA de 8 días (LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_TOA), para ver mejor los detalles en el ciclo fenológico. Así pues, se han calculado los valores de NDVI, del mismo modo que en el apartado anterior, pero en este caso para la colección del compuesto de 8 días.

A continuación, con estos valores se han elaborado gráficos con el ciclo fenológico para el periodo entre los años 2014 y 2020 con el objetivo de realizar dos análisis complementarios. Por un lado, se ha realizado una comparación entre el ciclo fenológico de los tres sectores (Mediana, Guara y Pirineos) sin tener en cuenta el régimen de pastoreo, y primando en cambio el hacer una aproximación más general y teniendo en cuenta los cambios entre los distintos años.

Por otro lado, se han realizado gráficos anuales para cada sector, en función del régimen de pastoreo (pastoreo alto, medio, bajo) y en base a los valores medios de las tres parcelas que incluye cada uno. Se ha centrado el análisis en el año 2019, incluyendo los gráficos correspondientes a este año en el apartado de resultados junto a su comentario. El resto de los gráficos para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2020 se recogen en los anexos finales (apartado 7.2).

Siguiendo la metodología de Zhang et al. (2003) en *Monitoring vegetation phenology using MODIS*, se ha procedido a describir el ciclo fenología en cada régimen de pastoreo para cada sector, identificando momentos clave del ciclo fenológico, y comparando a su vez los resultados entre unos y otros regímenes y sectores. Se describe el ciclo anual de la fenología de la vegetación mediante teledetección, identificando cuatro fechas de transición, las cuales definen las fases fenológicas clave de la dinámica de la vegetación a una escala de tiempo anual (Zhang et al., 2003).

Estas fechas de transición son “green-up”, “maturity” (madurez), “senescence” (senescencia) y “dormancy” (inactividad):

1. “*GREENUP*”: corresponde con la fecha de comienzo de la actividad fotosintética.
2. *MADUREZ*: la fecha en la cual el área foliar de la planta alcanza su máximo.
3. *SENESCENCIA*: la fecha desde la que la actividad fotosintética y el verdor en el área foliar empieza a decrecer rápidamente.
4. *INACTIVIDAD*: la fecha en la que la cual la actividad fisiológica de la planta llega casi a cero (Zhag et al., 2003).

La tendencia en el ciclo fenológico de la vegetación tiende a seguir estos patrones relativamente bien definidos. Por ejemplo, el surgimiento de las hojas suele ir seguido de un periodo de rápido crecimiento, seguido de un periodo de relativa estabilidad del máximo área foliar. Este patrón se repite, pero de forma inversa, con la transición de los periodos de senescencia a inactividad (Zhag et al., 2003).

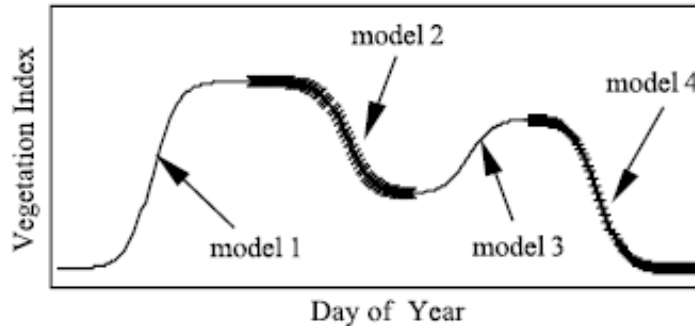


Figura 14. Trayectoria ideal de los valores del índice de vegetación con múltiples periodos de crecimiento descritos usando varios modelos logísticos. Fuente: Zhag et al., 2003.

Sin embargo, algunos tipos de vegetación presentan una mayor variabilidad, con varios modelos de crecimiento y senescencia en un único ciclo fenológico anual (Zhag et al., 2003), tal y como se representa en la *Figura 14*. En este caso no resulta posible seleccionar una fecha exacta para estos momentos clave del ciclo fenológico, ya que no contamos con un continuo de información, así que se establece a escala de mes.

Por último, remarcar que al contrario que en el proceso anterior, sí que se han mantenido los datos de noviembre a diciembre, teniendo en cuenta el efecto de la nieve en los meses de noviembre a febrero, ya que se ha primado la posibilidad de contar con el ciclo anual completo.

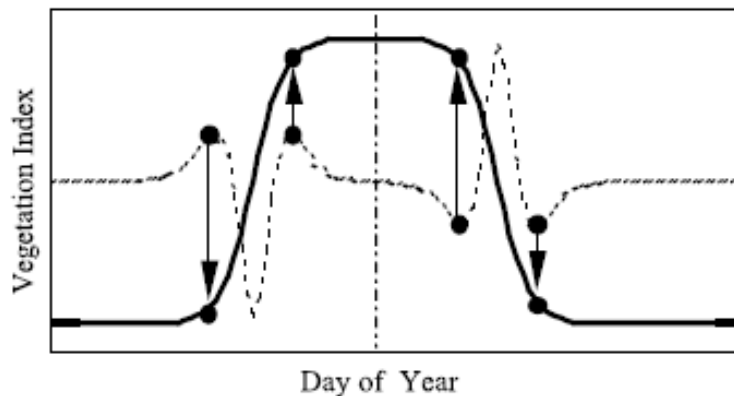


Figura 15. Esquema que muestra cómo las fechas de transición se calculan usando los valores mínimos y máximos en el cambio de la curvatura. La línea gruesa es una serie con datos de índices de vegetación ideales, y la línea discontinua el cambio en la curvatura con valores reales. Los círculos indican las fechas de transición. Los valores extremos localizados entre cada círculo indican el punto en el cual el ratio de cambio en la curvatura cambia de signo. Fuente: Zhag et al., 2003.

3. Resultados

3.1. Estudio estadístico entre categorías

A continuación, se muestran los resultados del estudio estadístico realizado, los cuales se han organizado siguiendo la estructura de agregación definida en la metodología de este trabajo, es decir, por sectores, localizaciones y parcelas, así como por unidades de carácter mensual y, sobre todo, por regímenes de pastoreo.

3.1.1. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre SECTORES

En primer lugar, realizamos una comparación de los sectores (M, G, P), determinando que ambos índices muestran la existencia de diferencias significativas entre todos los sectores, a partir del análisis de las diferencias entre categorías, realizado con un intervalo de confianza del 95%, y con un nivel de significación corregido de Bonferroni del 0'017.

En la *Figura 16* se muestra un gráfico con los valores medios y niveles de confianza al 95% para cada sector, en relación con el NDVI (*Figura 16.a.*), y SLAVI (*Figura 16.b.*).

Los valores más bajos corresponden claramente con Mediana, con una media estimada de 0'166 de NDVI y 0'727 de SLAVI, lo cual está ligado al menor desarrollo de la vegetación en términos de actividad fotosintética y recubrimiento vegetal como consecuencia del estrés hídrico y las condiciones edáficas de este sector.

Los valores más elevados de ambos índices de vegetación corresponden con el sector de Guara, con un 0'434 de media de NDVI y 1'434 de SLAVI, seguido del sector Pirineos, con un 0'341 de NDVI y 1'309 de SLAVI. Así pues, aunque las parcelas de Pirineos son las que cuentan con mejores condiciones pluviométricas, el mayor desarrollo y recubrimiento vegetal en Guara se debe a las buenas condiciones edáficas propias de los fondos de valle, donde se encuentran estas parcelas.

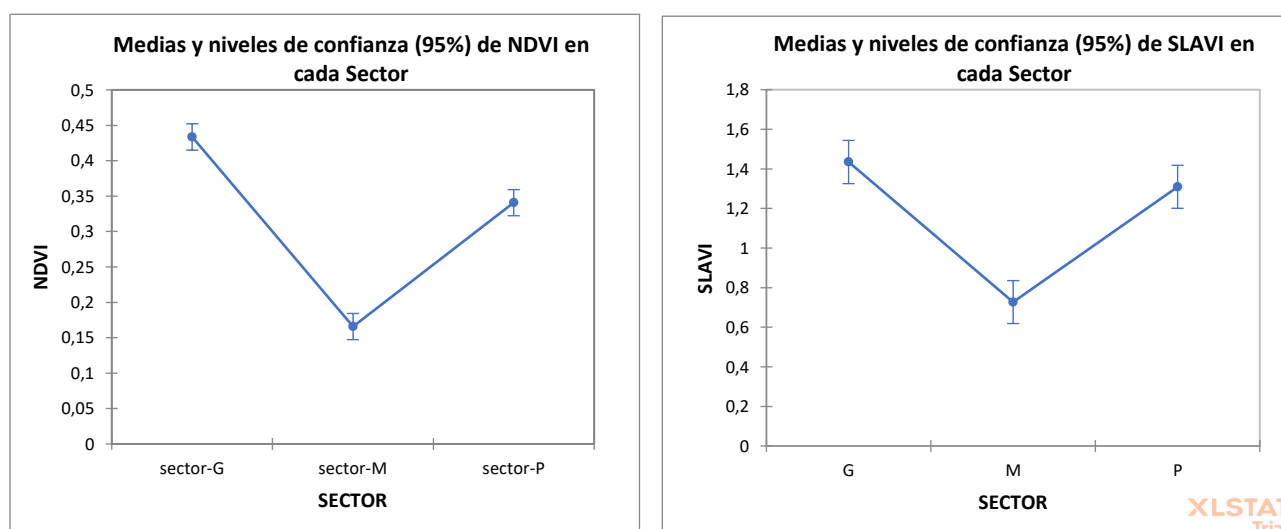


Figura 16 a y b. Gráficos de distribución de las medias y niveles de confianza (95%) de NDVI y SLAVI en cada SECTOR (Guara -G-, Mediana -M-, Pirineos -P-).

3.1.2. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre ZONAS

A continuación, analizamos las diferencias entre zonas de los valores de NDVI y SLAVI. Con los valores de NDVI determinamos que existen diferencias significativas entre la mayoría de las zonas que pertenecen a sectores distintos, y que a su vez no se encuentran diferencias significativas entre las zonas de un mismo sector, con un intervalo de confianza del 95%. Las zonas que presentan más problemas en cuanto a su definición son las de Pirineos, ya que no se han encontrado diferencias significativas entre Pirineos 3 y Pirineos 2 con la zona Guara 3. En cambio, empleando los valores de SLAVI únicamente se determina la existencia de diferencias significativas entre las zonas de Mediana con respecto a las demás, mientras que no las encuentra entre las zonas de Pirineos y Guara.

En las siguientes tablas se muestra la comparación por múltiples pares mediante el procedimiento de Dunn, o prueba bilateral, la cual agrupa las distintas zonas para los valores de NDVI (*Tabla 4*) y SLAVI (*Tabla 5*), reflejando lo explicado anteriormente. Mientras que, en las columnas, cada una de las letras en mayúscula identifica una agrupación de zonas, en las filas se reconoce el carácter de las diferencias entre las mismas, siendo estadísticamente significativas cuando no comparten fila ni, por supuesto, letra.

Muestra (zonas)	Grupos				
M3	A				
M1	A				
M2	A				
P2	B				
P3	B				
P1	C				
G3	C				
G1	D				
G2	D				
	E				
	E				
	E				

Tabla 4. Prueba bilateral con las agrupaciones de zonas con los valores de NDVI.

Muestra (zonas)	Grupos
M3	A
M2	A
M1	A
P2	B
P3	B
P1	B
G3	B
G1	B
G2	B

Tabla 5. Prueba bilateral con las agrupaciones de zonas con los valores del índice SLAVI.

En la *Figura 17* se muestran los gráficos con los valores medios y niveles de confianza al 95% para cada zona, en relación con el NDVI (*Figura 17.a.*) y SLAVI (*Figura 17.b.*). Un aspecto que destacar es la uniformidad en los valores medios en las zonas de Guara (con los valores de NDVI) y en las de Mediana, frente a las mayores variaciones que se observan en los valores de las zonas de Pirineos, principalmente Pirineos 2. Comparando con los resultados de SLAVI, el patrón en Guara y Pirineos es el mismo, mientras que, en Mediana, la zona con valores de SLAVI más elevados es la de Mediana 1, y con valores de NDVI corresponden con Mediana 2.

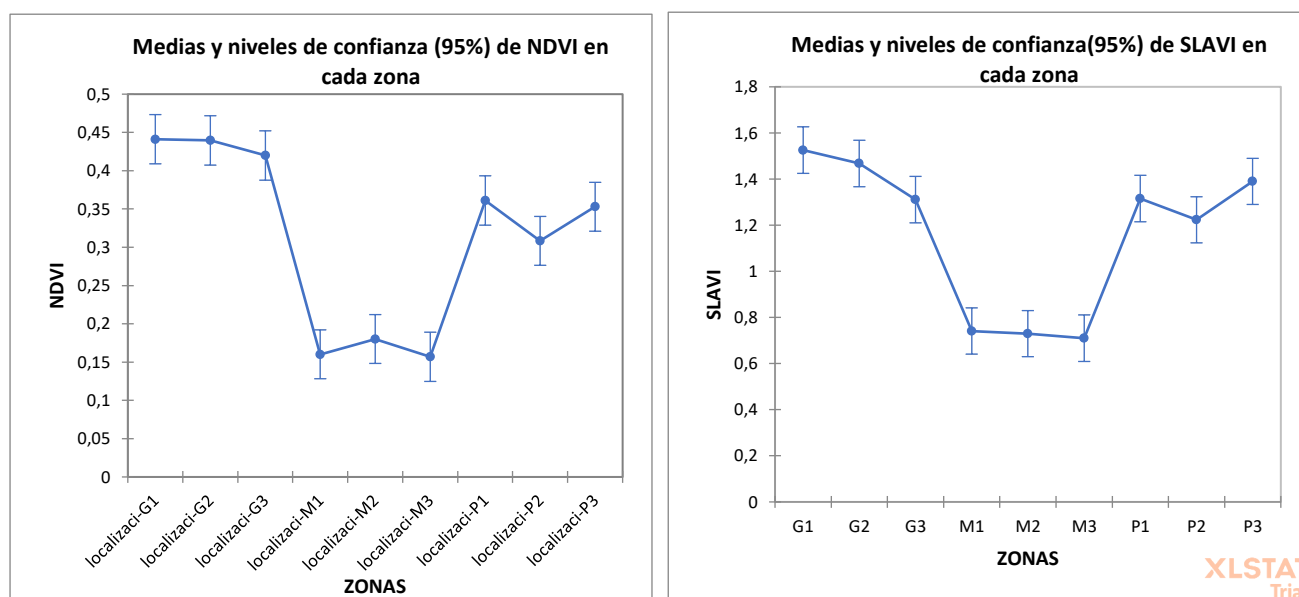


Figura 17 a y b. Gráficos de distribución de las medias y niveles de confianza (95%) de NDVI y SLAVI en cada ZONA (Guara 1 -G1-, Guara 2 -G2-, Guara 3 -G3-, Mediana 1 -M1-, Mediana 2 -M2-, Mediana 3 -M3-, Pirineos 1 -P1-, Pirineos 2 -P2-, Pirineos 3 -P3-).

3.1.3. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre los REGÍMENES DE PASTOREO.

Se ha realizado un análisis de las diferencias entre categorías para los distintos regímenes de pastoreo en su conjunto, omitiendo el factor de localización por sector. Este análisis, nos muestra que no existe significación estadística en la variable régimen de pastoreo, con un intervalo de confianza del 95%, y con un nivel de significación corregido de Bonferroni del 0'017.

A pesar de que no se encuentren diferencias significativas, resulta interesante comentar los gráficos de la *Figura 18*. En el gráfico que relaciona régimen de pastoreo con NDVI (*Figura 18.a.*), vemos como la media más elevada corresponde con el régimen de pastoreo bajo, con una media de 0'318, seguido del pastoreo medio, con 0'314 y, por último, los valores más bajos corresponden con el régimen de pastoreo alto, con una media de 0'307. En el caso del índice SLAVI (*Figura 18.b.*), apenas encontramos diferencias entre regímenes, con valores de 1'153 en pastoreo alto, 1'147 en pastoreo bajo y 1'167 en pastoreo medio.

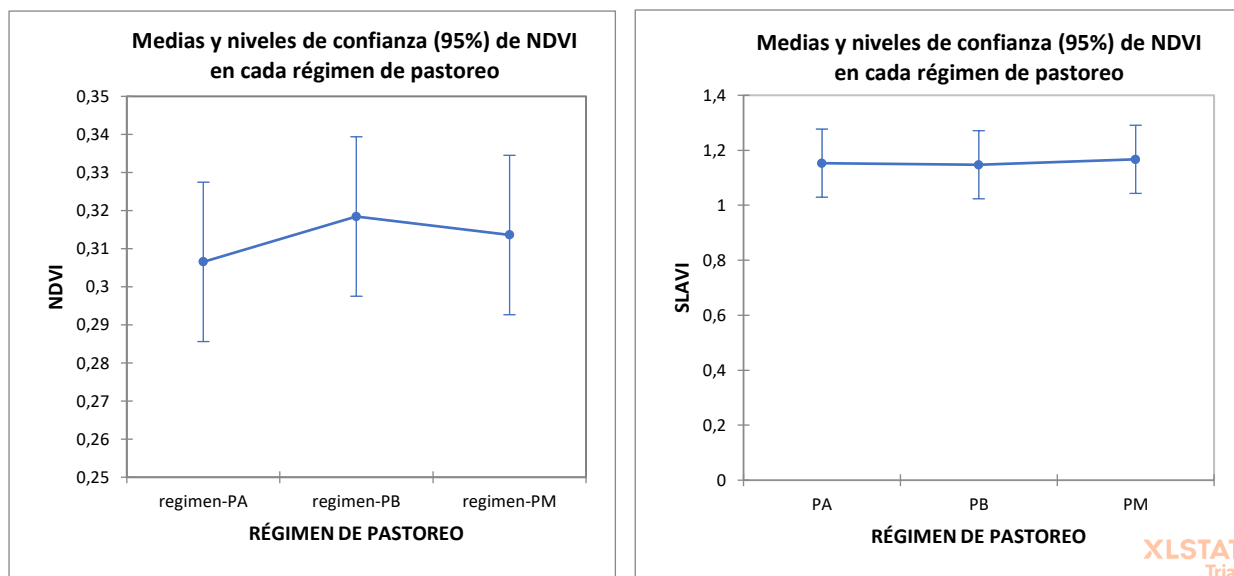


Figura 18 a y b. Gráficos de distribución de las medias y niveles de confianza (95%) de NDVI y SLAVI en cada régimen de pastoreo (pastoreo alto -PA-, pastoreo bajo -PB-, pastoreo medio -PM-).

3.1.4. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre los REGÍMENES DE PASTOREO por SECTOR.

A continuación, realizamos una comparación entre los distintos regímenes de pastoreo para cada sector, con el objetivo de analizar patrones en el desarrollo de la vegetación en términos de actividad fotosintética y recubrimiento vegetal para cada uno. Realizamos este análisis con los valores tanto de NDVI como de SLAVI, a partir del análisis de las diferencias entre regímenes, con un intervalo de confianza del 95% y un nivel de significación corregido de Bonferroni del 0'017.

En el caso de Mediana (*Figura 19*), con los valores de NDVI (*Figura 19.a.*) existen diferencias significativas entre los tres regímenes de pastoreo. Se constata cómo los valores más elevados de NDVI corresponden con el régimen de pastoreo bajo (con una media de 0'185), seguido del pastoreo medio (0'162) y, por último, los valores más bajos corresponden con el régimen de pastoreo alto (0'150). Al estar sometido a una situación de estrés hídrico, así como a unas duras condiciones edáficas, las variaciones en la carga ganadera sobre los pastos tienen un mayor impacto sobre la actividad fotosintética de la vegetación, así como sobre el recubrimiento vegetal de los mismos.

Sin embargo, cuando empleamos los valores del índice SLAVI (*Figura 19.b.*), el análisis estadístico no resulta en diferencias significativas entre los regímenes de pastoreo, con una media de 0'732 en pastoreo alto, 0'724 en pastoreo bajo y 0'725 en pastoreo medio; es decir que los valores más elevados son los del pastoreo alto, seguidos de pastoreo medio y por último pastoreo bajo. A continuación, en la *Figura 19* se incluyen los gráficos de bigotes para cada régimen de pastoreo en el sector de Mediana, de los valores de NDVI y SLAVI.

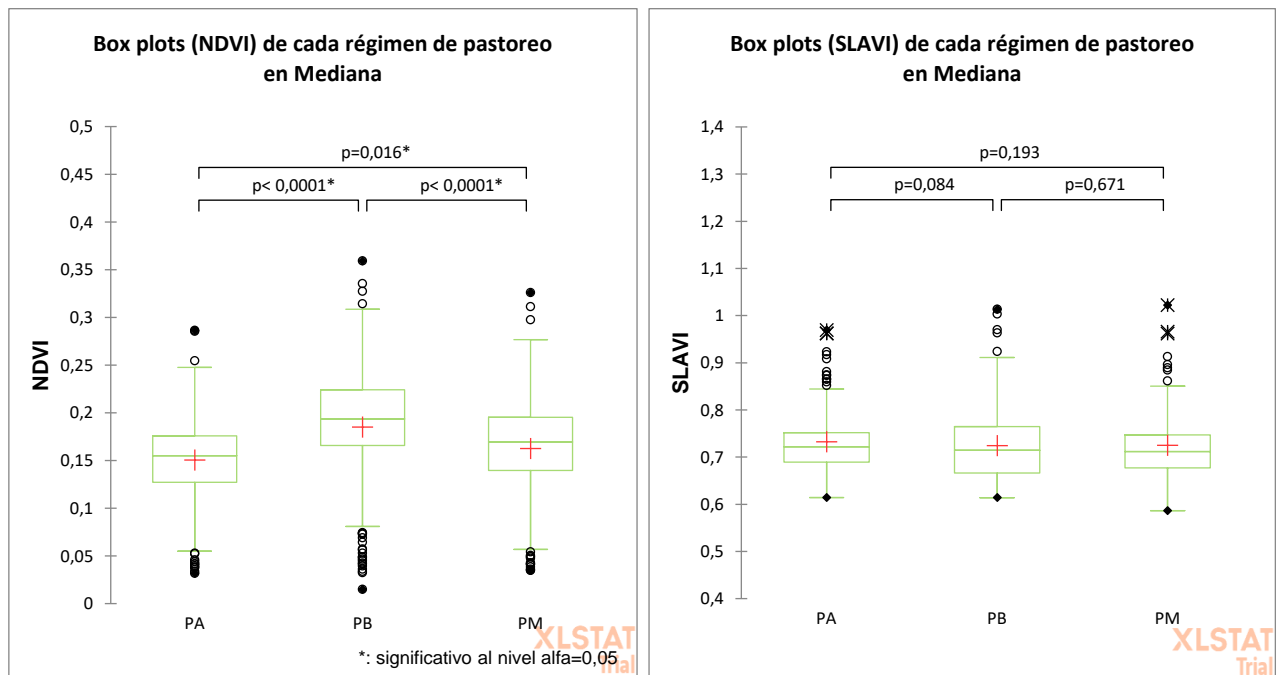


Figura 19 a y b. Gráficos de bigotes de cada régimen de pastoreo (pastoreo alto -PA-, pastoreo bajo -PB-, pastoreo medio -PM-) en el sector de Mediana con los valores de NDVI y SLAVI.

En el caso de Guara (*Figura 20*) no se han encontrado diferencias significativas entre los distintos regímenes de pastoreo de sus parcelas, en los valores del índice NDVI ni en el SLAVI; además, si nos centramos en la escala de localización, existen importantes variaciones en los valores más altos y bajos, y estas variaciones también se encuentran al comparar los distintos años.

En cuanto a los valores medios, el régimen de pastoreo con los valores de NDVI (*Figura 20.a.*) superiores es el pastoreo bajo, con 0'439, seguido del pastoreo medio, con 0'432, y los valores más bajos corresponden con el pastoreo alto, con 0'43. Si tomamos los valores de SLAVI (*Figura 20.b.*) los valores superiores son los del pastoreo medio, con 1'455, seguido del pastoreo bajo, con 1'431, y por último el pastoreo alto, con 1'418.

Es decir, aunque no se existe significación estadística entre los regímenes de pastoreo para ninguno de los dos índices en el caso de las parcelas de Guara, sí que se sigue un patrón en el cual los valores más elevados corresponden con el pastoreo bajo-medio, y los mínimos en pastoreo alto. Estas escasas diferencias entre regímenes pueden deberse al hecho que hemos comentado en apartados anteriores, sobre las características edáficas de estos pastos, lo que conllevaría una mayor resistencia de los pastos la presión ganadera, haciendo que las diferencias sean menores.

A continuación, en la *Figura 20*, se incluyen los gráficos de bigotes para los regímenes de pastoreo en el sector de Guara con los índices NDVI y SLAVI.

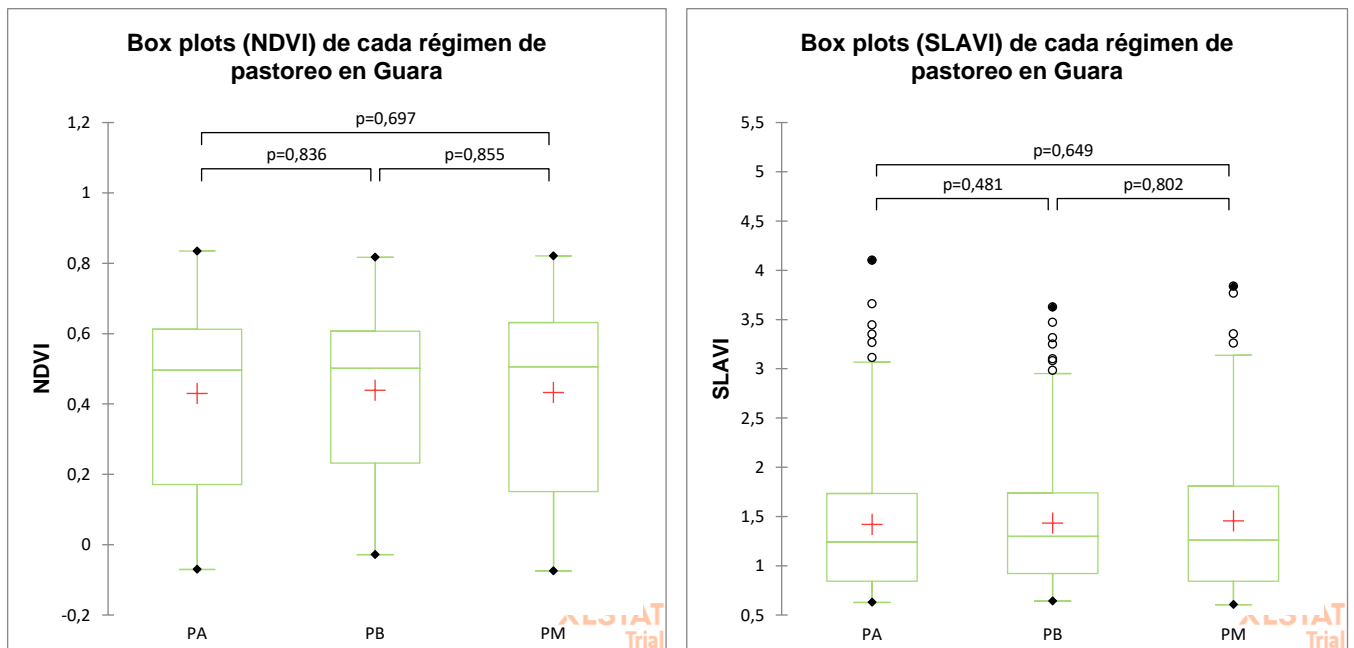


Figura 20 a y b. Gráficos de bigotes de cada régimen de pastoreo (pastoreo alto -PA-, pastoreo bajo -PB-, pastoreo medio -PM-) en el sector de Guara con los valores de NDVI y SLAVI.

En el sector de Pirineos (*Figura 21*) no se han encontrado diferencias significativas entre los distintos regímenes de pastoreo de sus parcelas, con el NDVI ni con el índice SLAVI. Con el índice NDVI (*Figura 21.a.*) observamos que los valores más elevados corresponden con el régimen de pastoreo medio (0'347), seguido del pastoreo alto (0'341), y por último el pastoreo bajo (0'334). Un aspecto relevante por destacar es la gran amplitud y variabilidad de valores que incluye cada uno de los regímenes, como se puede ver en el gráfico de la figura x. En cuanto al índice SLAVI (*Figura 21.b.*) se repite la misma situación que en el caso del NDVI, con los valores más elevados en el pastoreo medio (1'325), seguido del pastoreo alto (1'313) y por último el pastoreo bajo (1'290).

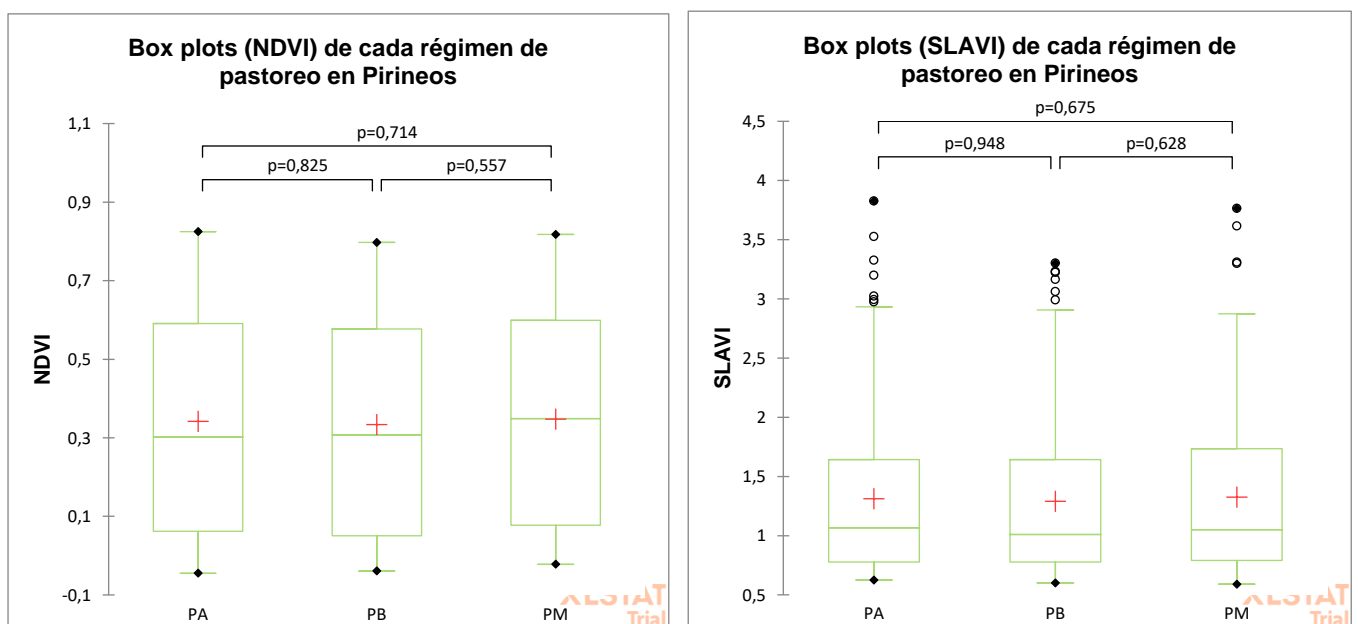


Figura 21 a y b. Gráficos de las medias de cada régimen de pastoreo en el sector de Pirineos con los valores de NDVI y SLAVI.

3.1.5. Diferencias de los valores de NDVI y SLAVI entre MESES por SECTORES

A continuación, se presentan los resultados de los análisis estadísticos realizados en relación con la distribución de los valores NDVI y SLAVI por meses en cada uno de los sectores. En las *Tablas 6, 7, 8, 9, 10 y 11* se recoge la distribución por meses (a excepción de los meses de invierno) ordenados en función de sus valores medios para cada índice de vegetación, destacando el factor de la altitud y la precipitación a la hora de explicar las diferencias.

En primer lugar, en el caso de Mediana (*Tablas 6 y 7*), podemos observar cómo los valores máximos se recogen en mayo y abril, mientras que los mínimos se producen en agosto y septiembre.

NDVI		SLAVI	
Junio	0,571	Junio	2,108
Julio	0,483	Julio	1,667
Agosto	0,426	Mayo	1,446
Mayo	0,378	Agosto	1,310
Octubre	0,364	Octubre	1,158
Septiembre	0,321	Septiembre	1,145
Abril	0,142	Abril	0,873
Marzo	0,041	Marzo	0,776

Tabla 6. Relación de meses de mayor a menor NDVI en Mediana. **Tabla 7.** Relación de meses de mayor a menor SLAVI en Mediana.

En el caso de Guara (*Tablas 8 y 9*), en cambio, los meses en los que se encuentran los valores máximos de NDVI y SLAVI son julio y abril, y los mínimos los de marzo, en ambos índices.

NDVI		SLAVI	
Julio	0,561	Junio	1,968
Abril	0,527	Abril	1,800
Junio	0,519	Mayo	1,545
Septiembre	0,404	Julio	1,527
Mayo	0,382	Octubre	1,221
Agosto	0,377	Septiembre	1,144
Octubre	0,370	Agosto	1,140
Marzo	0,311	Marzo	1,081

Tabla 8. Relación de meses de mayor a menor NDVI en Guara. **Tabla 9.** Relación de meses de mayor a menor SLAVI en Guara.

Por último, en el caso de Pirineos, los valores máximos de NDVI (*Tabla 10*) y SLAVI (*Tabla 11*) se recogen en los meses de junio y julio, mientras que los mínimos se producen en marzo.

NDVI		SLAVI	
Mayo	0,186	Mayo	0,766
Abril	0,183	Abril	0,759
Junio	0,180	Octubre	0,726
Julio	0,173	Junio	0,723
Marzo	0,162	Marzo	0,723
Octubre	0,148	Julio	0,716
Septiembre	0,148	Agosto	0,706
Agosto	0,146	Septiembre	0,696

Tabla 10. Relación de meses de mayor a menor NDVI en Pirineos. **Tabla 11.** Relación de meses de mayor a menor SLAVI en Pirineos.

En el gráfico de la *Figura 22* podemos ver la evolución mensual de los niveles de NDVI, en una media de los valores entre los años 2014-2020, el cual resulta interesante para ver los mínimos y máximos que comentábamos anteriormente, así como la relación entre los distintos sectores. Sin embargo, se han encontrado importantes diferencias entre unos años y otros, por lo que resulta de mayor interés realizar el análisis de forma individual para cada año. Así pues, el análisis de los valores de NDVI para los distintos meses se comenta más en profundidad en el apartado 3.2. de resultados, dedicado específicamente al análisis del ciclo fenológico.

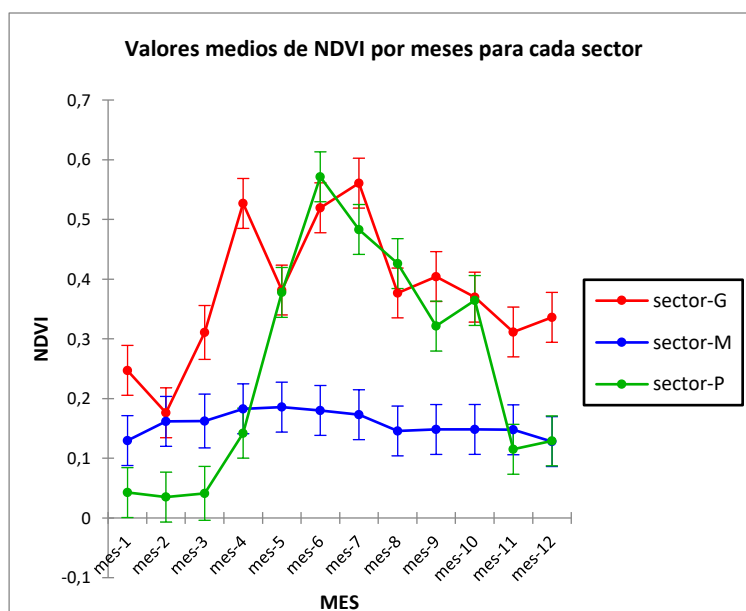


Figura 22. Valores medios de NDVI por meses para cada sector (Guara -G-, Mediana -M-, Pirineos -P-)

3.1.6. Modelos predictivos y explicativos con los índices NDVI y SLAVI

Con el objetivo de comprobar si los índices NDVI y SLAVI, así como la variable nominal SECTOR, pueden explicar el régimen de pastoreo, se ha realizado un análisis estadístico de árbol de clasificación y regresión, con el objetivo de crear un modelo explicativo y predictivo para la variable dependiente (el régimen de pastoreo) con las variables explicativas cuantitativas NDVI y SLAVI, y las variables explicativas cualitativas sector, mes y año. Para este proceso se ha definido el régimen de pastoreo de forma numérica: pastoreo medio como 0, pastoreo bajo como 1, y pastoreo alto como 2.

Como resultados, se ha constatado que la variable con capacidad explicativa de la variable del régimen de pastoreo es la variable independiente NDVI, ya que es la que marca la definición principal de cada una de las categorías, además de que las predicciones con porcentajes más elevados dependen únicamente del NDVI.

Así pues, si el NDVI es menor o igual a 0'14, entonces el régimen de pastoreo correspondería con un régimen de pastoreo alto en el 30% de los casos. Si el NDVI se encuentra entre 0'14 y 0'17, en un 10% de los casos también se correspondería con un régimen de pastoreo bajo. En cambio, si el NDVI se encuentra entre 0'17 y 0'32, se clasifica como régimen de pastoreo alto en el 20% de los casos, y si el NDVI supera el 0'32, entonces se clasifica como pastoreo alto también, en el 40% de los casos. El índice SLAVI influye en la predicción de los regímenes de forma mucho menor, al igual que ocurre con la variable sector. En la *Tabla 12* se incluye la estructura del árbol, y en la *Tabla 13* la relación de reglas definidas por este proceso.

Nodos	Objetos	%	Estat. de prueba	valor-p	Pureza	GL	Variable de separación	Valores	Nodo padre	Hijos	Valores predichos
Nodo 1	1497	100,00%	58,464	<0,0001	33,33%	6				2; 3; 4; 5	0
Nodo 2	449	29,99%	4,326	0,230	36,97%		NDVI	<= 0,14	1		2
Nodo 3	150	10,02%	22,176	0,002	46,67%	4	NDVI	(0,14; 0,17]	1	6; 7; 8	2
Nodo 4	299	19,97%	37,760	<0,0001	46,82%	4	NDVI	(0,17; 0,32]	1	9; 10; 11	1
Nodo 5	599	40,01%	3,418	0,543	33,89%		NDVI	> 0,32	1		1
Nodo 6	28	1,87%	9,405	0,281	57,14%		SLAVI	<= 0,67	3		0
Nodo 7	104	6,95%	16,064	0,001	57,69%	2	SLAVI	(0,67; 0,77]	3	12; 13	2
Nodo 8	18	1,20%	8,400	0,465	38,89%		SLAVI	> 0,77	3		0
Nodo 9	25	1,67%			92,00%		SLAVI	<= 0,67	4		1
Nodo 10	136	9,08%	14,890	0,001	49,26%	2	SLAVI	(0,67; 0,77]	4	14; 15	1
Nodo 11	138	9,22%	2,816	0,245	36,23%		SLAVI	> 0,77	4		1
Nodo 12	98	6,55%			59,18%		sector	M; G	7		2
Nodo 13	6	0,40%			50,00%		sector	P	7		1
Nodo 14	92	6,15%			43,48%		NDVI	<= 0,21	10		0
Nodo 15	44	2,94%			72,73%		NDVI	> 0,21	10		1

Tabla 12. Estructura del árbol de regresión y clasificación. Valores predichos: 0 es régimen de pastoreo medio, 1 régimen de pastoreo bajo, 2 pastoreo alto.

Nodos	Predicción	Reglas
Nodo 1	0	---
Nodo 2	2	Si NDVI $\leq 0,14$ entonces clasif = 2 en el 30,0% de los casos
Nodo 3	2	Si NDVI (0,14; 0,17] entonces clasif = 2 en el 10,0% de los casos
Nodo 4	1	Si NDVI (0,17; 0,32] entonces clasif = 1 en el 20,0% de los casos
Nodo 5	1	Si NDVI $> 0,32$ entonces clasif = 1 en el 40,0% de los casos
Nodo 6	0	Si NDVI (0,14; 0,17] y SLAVI $\leq 0,67$ entonces clasif = 0 en el 1,9% de los casos
Nodo 7	2	Si NDVI (0,14; 0,17] y SLAVI (0,67; 0,77] entonces clasif = 2 en el 6,9% de los casos
Nodo 8	0	Si NDVI (0,14; 0,17] y SLAVI $> 0,77$ entonces clasif = 0 en el 1,2% de los casos
Nodo 9	1	Si NDVI (0,17; 0,32] y SLAVI $\leq 0,67$ entonces clasif = 1 en el 1,7% de los casos
Nodo 10	1	Si NDVI (0,17; 0,32] y SLAVI (0,67; 0,77] entonces clasif = 1 en el 9,1% de los casos
Nodo 11	1	Si NDVI (0,17; 0,32] y SLAVI $> 0,77$ entonces clasif = 1 en el 9,2% de los casos
Nodo 12	2	Si NDVI (0,14; 0,17] y sector en [M; G] entonces clasif = 2 en el 6,5% de los casos
Nodo 13	1	Si NDVI (0,14; 0,17] y sector en [P] entonces clasif = 1 en el 0,4% de los casos
Nodo 14	0	Si NDVI (0,17; 0,32] y SLAVI (0,67; 0,77] y NDVI $\leq 0,21$ entonces clasif = 0 en el 6,1% de los casos
Nodo 15	1	Si NDVI (0,17; 0,32] y SLAVI (0,67; 0,77] y NDVI $> 0,21$ entonces clasif = 1 en el 2,9% de los casos

Tabla 13. Reglas resultado del árbol de regresión: pasto medio como 0, pasto bajo 1 y pasto alto 2.

3.1.7. Análisis de la relación entre los valores de NDVI y SLAVI

Tanto NDVI como SLAVI son índices de vegetación que realzan la vegetación en función de su respuesta espectral, atenuando otras cubiertas, mediante combinaciones de bandas espectrales. Así pues, se han analizado las relaciones entre ambos índices para el régimen de pastoreo, mediante un análisis de regresión.

En el gráfico de la *Figura 23* se muestra la nube de puntos, con el NDVI (variable dependiente) en el eje de las ordenadas, y SLAVI (variable explicativa cuantitativa) en las abscisas. En la nube de puntos quedan reflejados los valores para cada régimen de pastoreo (variable explicativa cualitativa): pastoreo alto en rojo, pastoreo bajo en azul y pastoreo medio en verde.

Como resultado del análisis de regresión determinamos que R^2 , el porcentaje de variación en la variable de respuesta que es explicado por el modelo es 0'787, es decir, que los valores de SLAVI explican en un 78'7% a los de NDVI.

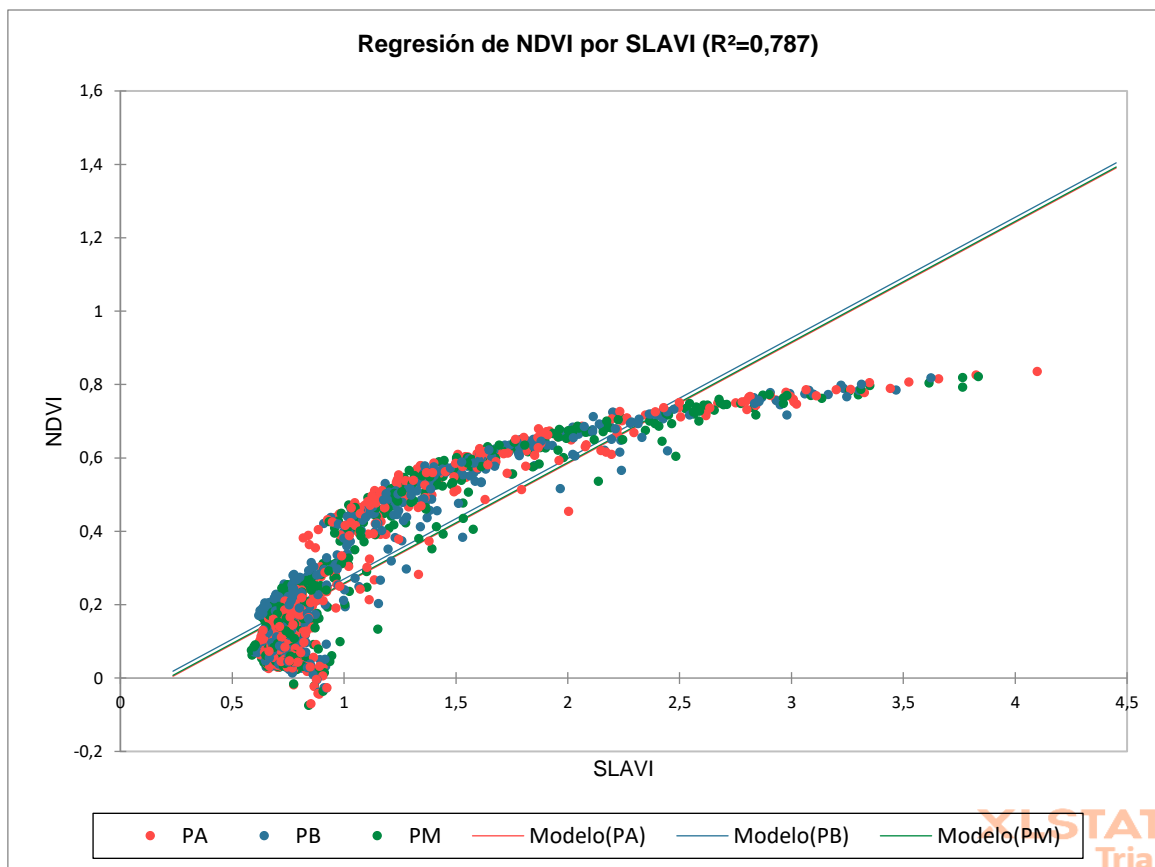


Figura 23. Gráfico de dispersión de NDVI y SLAVI para cada régimen de pastoreo: Pastoreo alto (PA) en rojo, pastoreo bajo (PB) en azul y pastoreo medio (PM) en verde.

Existe una relación elevada y de tipo logarítmico entre ambos índices, los cuales pueden complementarse. Sin embargo, teniendo en cuenta que, a lo largo de todos los análisis estadísticos anteriores, el índice que mejor ha definido las diferencias en las variables ha sido el NDVI, para el análisis del ciclo fenológico, cuyos resultados se muestran en el apartado 3.2., se ha optado por centrarnos en los valores de NDVI.

3.2. Evolución del ciclo fenológico

Se ha analizado el ciclo fenológico de la vegetación para cada régimen de pastoreo y cada sector. En primer lugar, en las *Figuras 24 y 25*, se incluyen los gráficos correspondientes a los ciclos fenológicos de la vegetación entre los años 2014 y 2020, para cada sector, sin tener en cuenta el régimen de pastoreo, con el objetivo de calibrar el alcance de las diferencias en los valores de NDVI en función de las características edafo-bioclimáticas de los tres sectores. En dichas figuras, los puntos en azul se corresponden con los valores de Guara, en rojo los de Mediana, y en naranja los de Pirineos. En el eje de las ordenadas se incluyen los valores de NDVI y en las abscisas la información temporal.

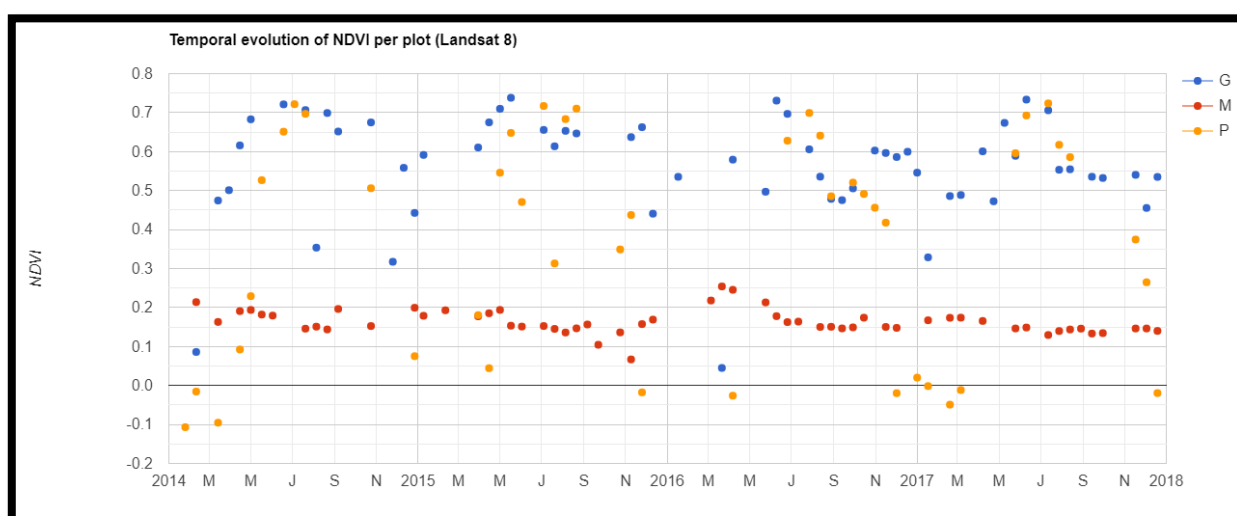


Figura 24. Ciclo fenológico por sectores para los años 2014-2017: Mediana en rojo, Guara en azul y Pirineo en naranja.

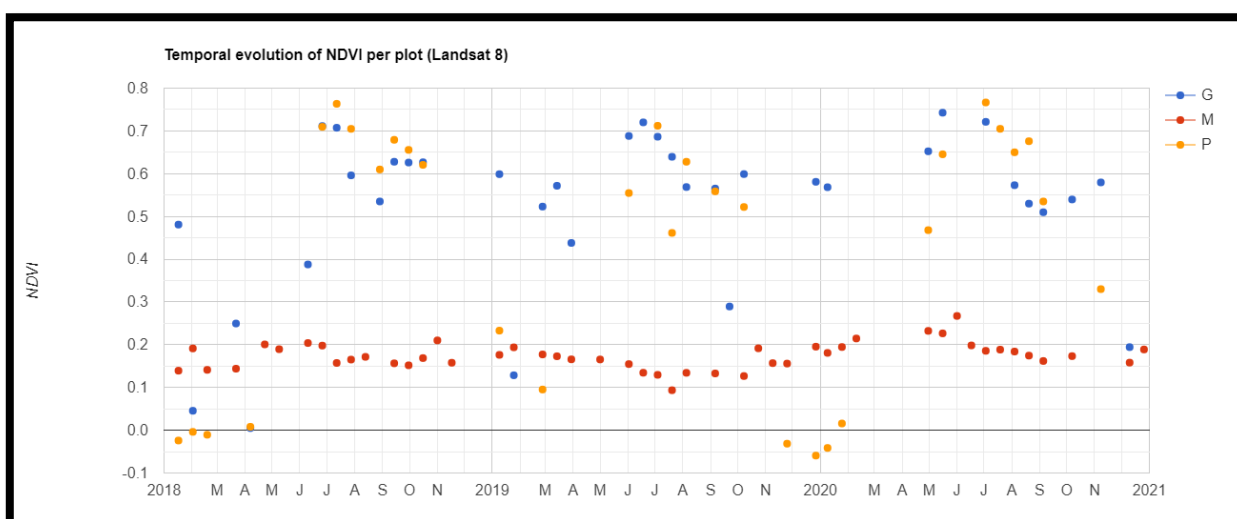


Figura 25. Ciclo fenológico por sectores para los años 2018-2020: Mediana en rojo, Guara en azul y Pirineo en naranja.

Con una primera observación de los datos destaca la diferente trayectoria de los ciclos del sector de Mediana respecto a los de Guara y Pirineos. Los valores de NDVI en Mediana son muy bajos, en relación con las características fisionómicas de la vegetación,

dominantemente arbustiva y leñosa, y las implicaciones del estrés hídrico y las condiciones edáficas de los ambientes de estepa, con un régimen semiárido. Encontramos además una gran uniformidad en este sector en cuanto a los valores de NDVI a lo largo de todo el ciclo fenológico, lo cual depende estrechamente de la componente arbustiva de la vegetación dominante en Mediana, en contraposición con el carácter herbáceo de la vegetación en Mediana y Pirineos. Si lo comparamos a misma escala que los demás sectores apenas se encuentran diferencias, siendo necesario un análisis más detallado para poder encontrar patrones en el ciclo fenológico para Mediana.

En cambio, en los sectores de Guara y Pirineos los valores de NDVI son mucho más elevados, salvo en algunos meses invernales. En general los valores más elevados son los de Guara, lo que podría estar ligado a las propiedades edáficas de estos pastos, que corresponden con fondos de valle.

En el sector de Pirineos encontramos intervalos en los que faltan muchos datos, sobre todo en el invierno. Ello se debe a que hay muchas imágenes afectadas por las sombras. Por ejemplo, en Pirineos 2 (P2) el efecto de las sombras es muy importante, ya que sus parcelas se localizan junto al ibón de Piedrafita, en la cara norte de Peña Telera. La localización menos afectada por las sombras es Pirineos 1 (P1), ya que sus parcelas se encuentran en laderas de solana.

Otro aspecto de interés es la comparación del inicio del *green-up* entre Guara y Pirineos, comenzando antes en el sector de Guara y seguido, generalmente medio o un mes después, por Pirineo, efecto que podría estar ligado a las diferencias de altitud.

Para hacer un análisis más detallado de cada sector sobre en el régimen de pastoreo, ajustamos la escala temporal a un único ciclo anual, seleccionando los años con mayor densidad de datos (2018 y 2019), decantándonos por 2019, al tratarse de un año más próximo en el tiempo. En este sentido, el año 2020 habría sido una buena opción si no fuera porque cuenta con una ausencia total de datos entre los meses de primavera, lo cual puede estar relacionado con la situación derivada del confinamiento por el Covid-19, así como por la situación administrativa. Las gráficas con los ciclos fenológicos correspondientes a los demás años (2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2020) se han incluido en el apartado 7.2. de Anexos: Gráficos del ciclo fenológico para los distintos sectores.

En la *Figura 26* podemos ver el ciclo fenológico anual del sector de Mediana para el año 2019. En azul se representan los valores de NDVI medios para las parcelas con un régimen de pastoreo alto, en naranja el pastoreo medio y en rojo el pastoreo bajo.

El aspecto más destacable del ciclo fenológico anual en el sector de Mediana para los tres regímenes de pastoreo es la escasa variabilidad interanual, con los valores mínimos en julio y máximos a finales de enero y finales de octubre, como es propio de las estepas del valle del Ebro.

Otro aspecto importante es que los valores de NDVI en este sector son siempre superiores con régimen de pastoreo bajo (PB). Le sigue el régimen de pastoreo alto (PA) y pastoreo medio (PM), entre cuyos valores apenas hay diferencias en la mayoría de los casos. Además, en los meses de verano los valores de NDVI descienden mucho más en

las parcelas de pastoreo alto y pastoreo medio que en las de pastoreo bajo, el régimen que mantiene una constancia mayor en sus valores. La mayor amplitud entre valores se encuentra a mitades del mes de julio, con los valores mínimos en las parcelas de pastoreo medio y alto, mientras pastoreo bajo ni siquiera cuenta con el mínimo en ese momento, sino en el mes de agosto.

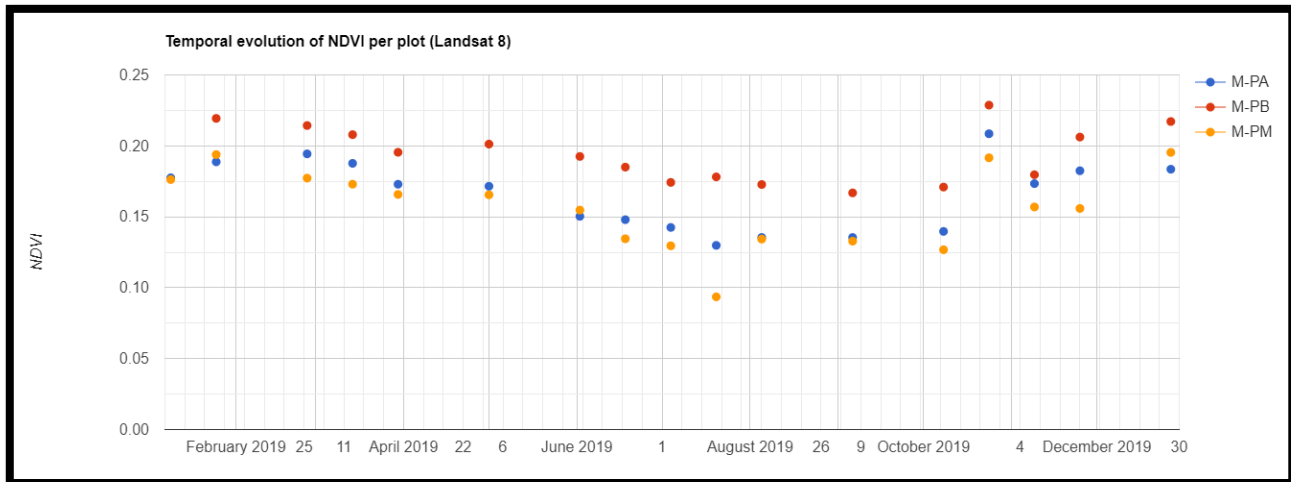


Figura 26. Ciclo fenológico anual (2019) en el sector de Mediana para cada régimen de pastoreo: Pastoreo alto (PA) en azul, pastoreo bajo (PB) en rojo y pastoreo medio (PM) en naranja.

Se puede observar ligeramente los periodos de valores de NDVI más elevados en el otoño (a finales de noviembre-diciembre), y entre finales de enero y mayo. En octubre hay un pico de valores elevados importante, con los valores más elevados de todo el ciclo anual, pero al alcanzar un máximo al final del mes, en lugar de encontrar un periodo de madurez con estabilidad en los valores de ndvi, estos vuelven a descender a inicios de noviembre, aumentando otra vez en diciembre.

Los valores de invierno y primavera van, desde el máximo de finales de enero y febrero, descendiendo lentamente a lo largo de los siguientes meses, y alcanzando los valores mínimos al final del verano, en septiembre.

El pico de bajos valores de NDVI que encontramos en julio, en el régimen de pastoreo alto y medio, y que no aparece en el régimen de pastoreo bajo, puede deberse a que, encontrándonos en el periodo del año con un mayor estrés hídrico, la presión de la carga ganadera afecta en un grado mucho mayor.

Si comparamos con otros años, el único año en el que podemos ver mejor el *green-up*, junto con el periodo de madurez y senescencia sería el año 2016, con un *green-up* que empezaría en febrero, madurez entre los meses de marzo y abril (aunque continuarían aumentando los valores), y desde entonces, un descenso de los valores (senescencia) hasta llegar a los valores mínimos del verano de los que hablábamos para 2019.

A continuación analizamos el caso de Guara, cuyo gráfico de evolución del ciclo fenológico anual para 2019 en los tres regimenes de pastoreo se presenta en la *Figura 27*. En este caso, encontramos una mayor variabilidad anual en los valores de NDVI; además, no existen diferencias claras entre los distintos regimenes de pastoreo, con meses en los

que los valores más elevados de NDVI corresponden con las parcelas de régimen de pastoreo bajo (junio), otras en medio (febrero) y otras con el régimen de pastoreo bajo (finales de marzo). Sí que podríamos encontrar un patrón que se repite entre los años, que es que mientras en los meses de invierno sí que existe una gran variabilidad, e incluso los valores más elevados son en parcelas de régimen de pastoreo alto, en los meses de verano, a partir de junio, en la mayoría de los casos esto cambia, siendo más elevados los valores de pastoreo bajo, lo cual puede deberse a la entrada del ganado en los meses estivales. Además, el hecho de la escasa diferencia entre regímenes pastoreo puede estar relacionado con la gran calidad de los pastos en este sector, de forma que no se ven apenas afectados por la carga ganadera.

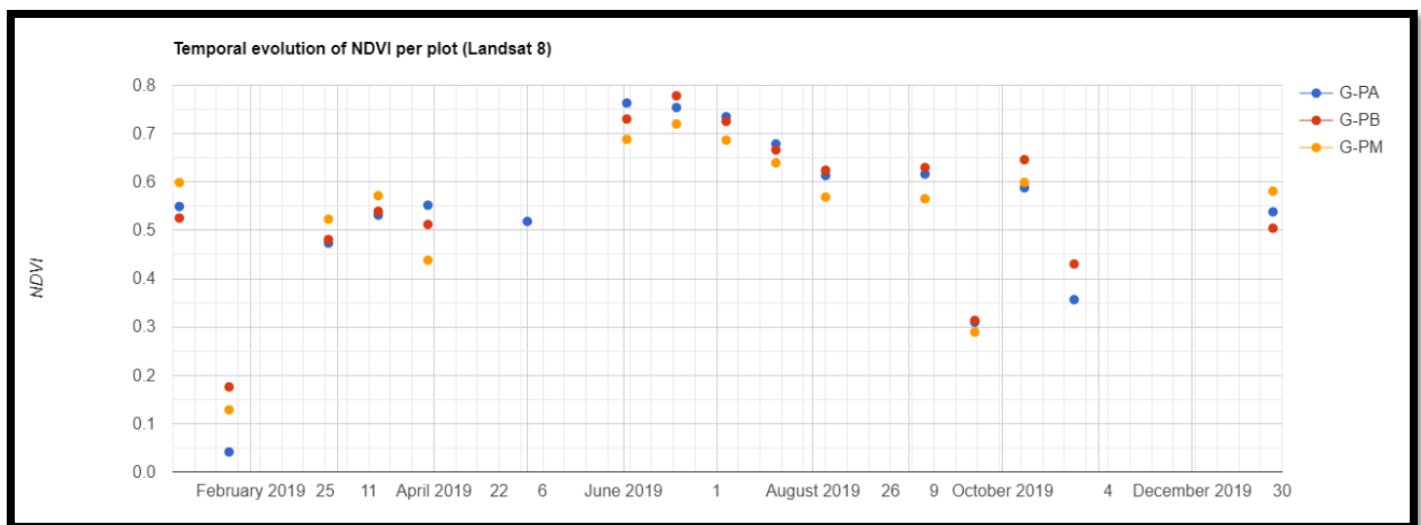


Figura 27. Ciclo fenológico anual (2019) en el sector de Guara para cada régimen de pastoreo: Pastoreo alto (PA) en azul, pastoreo bajo (PB) en rojo y pastoreo medio (PM) en naranja.

En cuanto al patrón en el ciclo fenológico, en 2019 podríamos fijar el inicio del *green-up* a finales de enero-principios de febrero, con los valores más elevados en el régimen de pasto bajo, y los menores en el pasto alto; también es el momento con mayores diferencias entre tipos de régimen de pastoreo.

A finales del mes de febrero podríamos hablar de una etapa de madurez, en el cual los valores mas altos de este periodo dejan de ser los de pasto bajo, pasando a ser los de pasto medio. A lo largo del mes de febreroy marzo los valores de NDVI se mantienen relativamente estables, y en el mes de mayo encontramos otro salto en los valores de NDVI, pudiendo halar de un segundo momento de *green-up* al final de la primavera. Sin embargo en este perido únicamente hay dato de pasto alto, aunque teniendo en cuenta las escasas diferencias entre los regimenes en los demás meses, es probable que los valores de régimen de pastoreo medio y bajo se encontraran próximos al de pastoreo alto.

El mes de junio da comienzo a otro nuevo periodo de madurez, a lo largo del cual los valores de NDVI van descendiendo progresivamente. Además, si al inicio de esta etapa los valores de NDVI eran más elevados en el régimen de pastoreo alto, a lo largo de estos meses la situación va cambiando en favor del pastoreo bajo, lo cual puede deberse a la actividad ganadera.

El inicio de octubre da paso a una etapa de senescencia, con un descenso en los valores de NDVI, donde el régimen de pastoreo bajo cuenta con los valores más altos, y los menores el pastoreo alto.

Por último, analizamos el caso del sector de Pirineos. Se ha tratado de hacer la comparación de la misma forma que en los otros sectores, sin embargo, existen algunas diferencias entre las distintas localizaciones que han llevado a la decisión de hacer el análisis de forma individual por parcelas, para poder tener en cuenta las diferencias entre las mismas, y que llevan a valores poco representativos al sacar las medias de los valores.

Así pues, la *Figura 28* nos es útil para ver la evolución del ciclo fenológico en general para los Pirineos, pero no las diferencias entre regímenes de pastoreo, debido a las importantes diferencias entre las localizaciones de las diferentes parcelas. Además, faltan muchos datos para varias de las parcelas debido a las sombras, lo que no permite realizar una correcta representación gráfica. Es por ello que se ha obtenido el gráfico de la *Figura 29*, con los valores individuales de cada parcela.

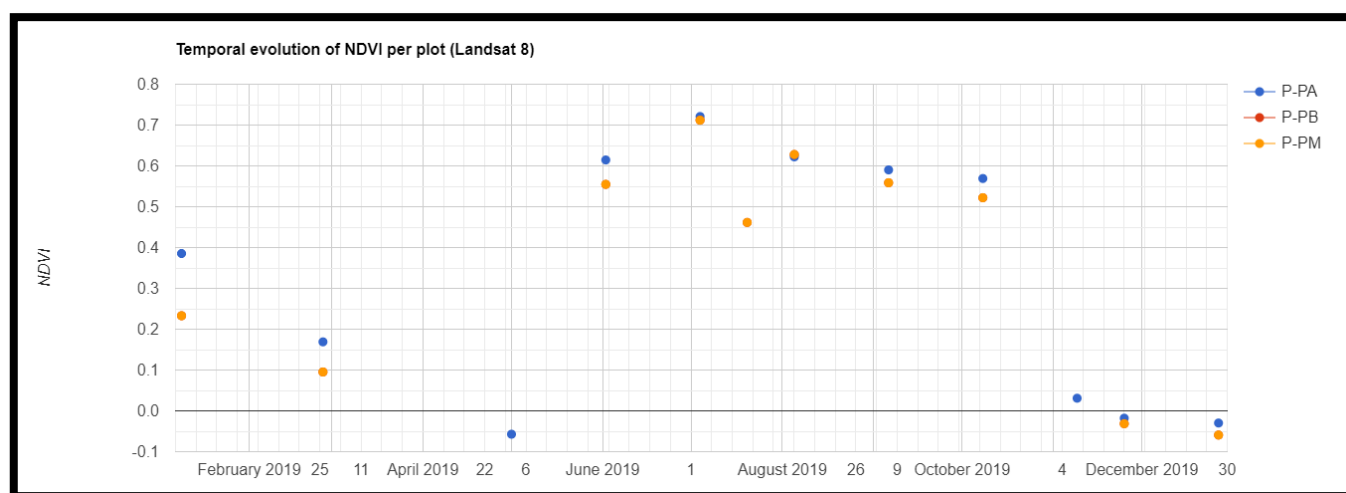


Figura 28. Ciclo fenológico anual (2019) en el sector de Pirineos para cada régimen de pastoreo: Pastoreo alto (PA) en azul y pastoreo medio (PM) en naranja.

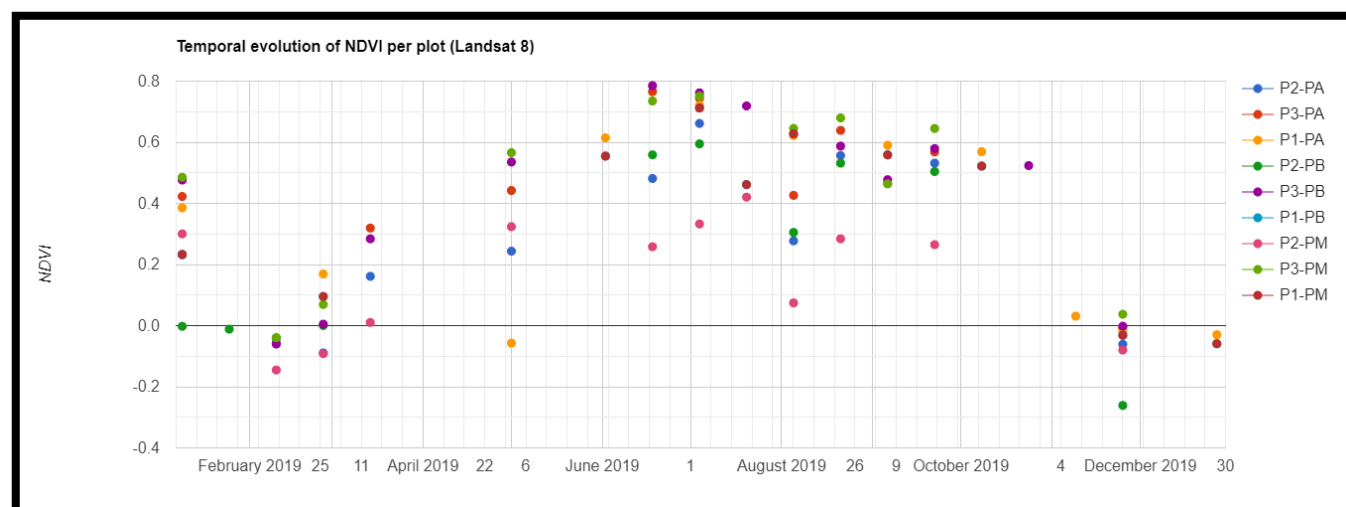


Figura 29. Ciclo fenológico anual (2019) en el sector de Pirineos para cada parcela: Pastoreo alto de Pirineos 1 (P1-PA) en naranja, pastoreo medio de Pirineos 1 (P1-PM) en granate, pastoreo alto de

Pirineos 2 (P2-PA) en azul, pastoreo bajo de Pirineos 2 (P2-PB) en verde oscuro, pastoreo medio de Pirineos 2 (P2-PM) en rosa, pastoreo alto de Pirineos 3 (P3-PA) en rojo, pastoreo bajo de Pirineos 3 (P3-PB) en morado, y pastoreo medio de Pirineos 3 (P3-PM) en verde claro.

Observando el gráfico de la *Figura 29* del ciclo fenológico anual de 2019, podemos ubicar el *green-up* a finales de febrero e inicios de marzo; además, si comparamos con otros años, este momento oscila a lo largo del mes de marzo.

El periodo de madurez se alcanza en junio, tanto en el año 2019 como en los demás años de estudio. Desde este momento, los valores se mantienen elevados en un periodo de relativa estabilidad a lo largo de los meses consiguientes, descendiendo lentamente, hasta el mes de octubre. Es en octubre cuando podemos fijar el comienzo del periodo de senescencia, dando paso a un descenso muy marcado de los valores de NDVI. A finales de otoño y a lo largo del invierno encontramos valores negativos de NDVI, lo cual se debe a la nieve.

En Pirineos 1 (P1) tanto los valores de pastoreo alto como medio son muy similares a lo largo de todo el ciclo anual, superando ligeramente los de pastoreo alto a los de pastoreo medio en la mayoría de los casos. Sin embargo, en el caso de Pirineos 2 y Pirineos 3 este patrón no se cumple: en Pirineos 2 los valores de la parcela de pasto medio son considerablemente más bajos en la mayoría de los casos, seguidos del pastoreo alto, y los valores más altos corresponden con el pastoreo bajo, y en Pirineos 3, los valores más elevados se encuentran en la parcela de pastoreo bajo, seguida de pastoreo medio en la mayoría de los casos, y los valores más bajos corresponden con la parcela de pastoreo alto.

4. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha estudiado la distribución de los valores de dos índices espectrales de vegetación (NDVI y SLAVI) en función de diferentes regímenes de carga ganadera, a lo largo de un gradiente bioclimático en Aragón.

Como primer objetivo se había establecido el realizar un análisis del efecto de la carga ganadera sobre los pastos, en ambientes sometidos a distinto estrés hídrico, a lo largo del transecto entre el centro del valle del Ebro y los Pirineos. El segundo objetivo definido era estudiar la efectividad de productos Landsat, concretamente de Landsat-8, y centrándonos en los índices NDVI y SLAVI como herramientas para analizar las diferencias producidas por la distinta carga ganadera sobre diferentes ecosistemas pascícolas.

Para cumplir estos dos objetivos se han empleado las colecciones LANDSAT/LC08/C01/T1_32DAY_TOA y LANDSAT/LC08/C01/T1_08DAY_TOA, aplicando sobre las mismas una máscara para eliminar los valores correspondientes a la nubosidad. A partir de los datos de estas colecciones se han calculado los índices de vegetación NDVI y SLAVI y se han realizado análisis estadísticos entre las distintas categorías.

Entre los tres sectores, Guara, Mediana y Pirineos, se han encontrado diferencias significativas en los valores de NDVI, con valores medios ligados a las condiciones climáticas y edáficas de cada sector. En cuanto a las diferencias entre zonas, el NDVI registra diferencias significativas entre las zonas de los distintos sectores, mientras que SLAVI no las registra entre las zonas de Guara y Mediana.

En cuanto a los regímenes de pastoreo, al analizarlos en su conjunto, sin tener en cuenta el sector en el que se ubican, no existe significación estadística para ninguno de los dos índices, aunque con una representación gráfica de los valores medios de NDVI sí que se observa una ordenación de estos, con los valores mínimos en el régimen de pastoreo alto y los máximos en el pastoreo bajo. Analizando los regímenes de pastoreo para cada sector, se encuentran diferencias significativas entre los regímenes de Mediana con el NDVI. En cuanto al patrón en los valores medios, en Pirineos los valores mínimos se registran en el régimen de pastoreo bajo, y los máximos en el pastoreo medio, mientras que, tanto en Mediana como en Guara, los valores mínimos corresponden con el régimen de pastoreo alto, y los máximos con el pastoreo bajo, aunque en Guara existen variaciones si se analizan las diferencias en cuanto a las localizaciones y años.

Analizando la relación de los valores de NDVI y SLAVI por meses en cada uno de los sectores, se muestra como los valores máximos en Mediana se recogen en mayo y los mínimos en agosto y septiembre; en Guara los máximos corresponden con julio y abril, y los mínimos en marzo, y en Pirineos, los máximos se recogen en junio y julio, y los mínimos en marzo, destacando el factor de la altitud y la precipitación a la hora de explicar estas variaciones.

También se ha realizado un análisis estadístico de árbol de clasificación y regresión para estudiar si los índices NDVI y SLAVI, junto con las variables sector, mes y año, pueden explicar el régimen de pastoreo; determinando que la variable con capacidad

explicativa es el NDVI. Así pues, la capacidad predictiva del modelo establece los porcentajes de probabilidad de que un punto corresponda con cada régimen de pastoreo, en función de, principalmente, el NDVI.

Por último, en relación con estos primeros objetivos, se han analizado las relaciones entre ambos índices en su capacidad explicativa del régimen de pastoreo, mediante un análisis de regresión, determinando que los valores de SLAVI explican en un 78'7% a los de NDVI. De este modo, establecemos que la relación entre ambos índices es elevada, siendo el NDVI y el SLAVI índices que se complementan en su utilidad para estudiar el impacto de la carga ganadera sobre los pastos.

Como tercer y último objetivo se había establecido realizar una descripción del ciclo fenológico en los tres ambientes biogeográficos a partir de la serie Landsat, en el periodo comprendido entre 2014 y 2020. Así pues, se ha analizado el ciclo fenológico de la vegetación para cada régimen de pastoreo de los tres sectores. En Mediana los valores son muy bajos y uniformes, ligados a una vegetación predominantemente arbustiva y al estrés hídrico, propios de un régimen semiárido. Además, las parcelas con un régimen de pastoreo bajo siempre registran los valores máximos de NDVI, y los mínimos en el régimen de pastoreo alto. Guara y Pirineos cuentan con valores mucho más elevados, además de presentar importantes variaciones a lo largo de sus ciclos fenológicos, lo cual está relacionado con el carácter herbáceo de la vegetación de estos pastos, y las mayores precipitaciones en estos sectores y sus propiedades edáficas.

En conclusión, se ha comprobado que las series multitemporales de índices espectrales de vegetación, NDVI y SLAVI, extraídos de productos Landsat, son sensibles a las consecuencias derivadas del diferente régimen de carga ganadera que presentan los ecosistemas pascícolas, teniendo en consideración las características y individualidades propias de cada ambiente bioclimático.

5. Bibliografía

- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J. (2009). Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics. *Plant Ecology*, 202(1), 13-29.
- Ariza, A. (2013). Descripción y corrección de Productos Landsat-8, LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Bogotá, Colombia.
- Betrán, R., Barrantes, O., Reiné, R. (2016). Vías pecuarias y recursos pascícolas en rutas trashumantes de ovino de la provincia de Huesca. *Lucas Mallada*, 18, 273-310.
- Caballero, R., Fernández, F., Pérez-Badía, R. (2009). Grazing Systems and biodiversity in Mediterranean areas: Spain, Italy and Greece. *Pastos*, 39, 9-152.
- Caparros Santiago, J., Rodríguez-Galiano, V. (2020). Vegetation phenology from satellite imagery: the case of the Iberian Peninsula and Balearic Islands (2001-2017). *Revista de Teledetección*, 57, 25-36.
- Dixon, AP., Faber-Langendoen, D., Josse, C., Morrison, J., Loucks, CJ. (2014). Distribution mapping of world grassland types. *Journal of Biogeography* 41: 2003-2019.
- Eastman, J., Sangermano, F., Machado, E., Rogan, J., Anyamba, A. (2013). Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982-2011. *Remote Sensing Journal*, 5, 4799-4818.
- FAO, O. d. (2006). La larga sombra del ganado. Roma (Italia): Ed. FAO.
- Franco García, J. (2018). Reconocimiento de patrones temporales para la clasificación digital de pastizales de alta montaña (*Bromion erecti* y *Nardion strictae*). Trabajo Fin de Máster, Universidad de Zaragoza.
- García Ramírez, P., Domínguez-Caballeros, P., Corral-Rivas, J., Pompa-García, M. (2021). Estimación del volumen forestal mediante imágenes del satélite Landsat 8 OLI en bosques templados mixtos. *Investigación y Ciencia*, vol.29, núm.81, 40-49.
- Gartzia, M., Pérez-Cabello, F., Bueno, C., Alados, C. (2014). Assessment of the effects of biophysical and anthropogenic factors on woody plant encroachment in dense and sparse mountain grassland based on remote sensing data. *Prog. Phys. Geog.*, 38, 201-217.
- Fillat, F., García González, R., Gómez García, D., Reiné, R.(Eds.), (2008). Pastos del Pirineo: breve descripción ecológica y florística. *Pastos del Pirineo: 111-140*.
- Gómez, C., Alejandro, P., Montes, F. (2020). Phenological characterization of *Fagus sylvatica* L. in Mediterranean populations of the Spanish Central Range with Landsat OLI/ETM+ and Sentinel -2A/B. *Revista de Teledetección*, 55, 71-80.

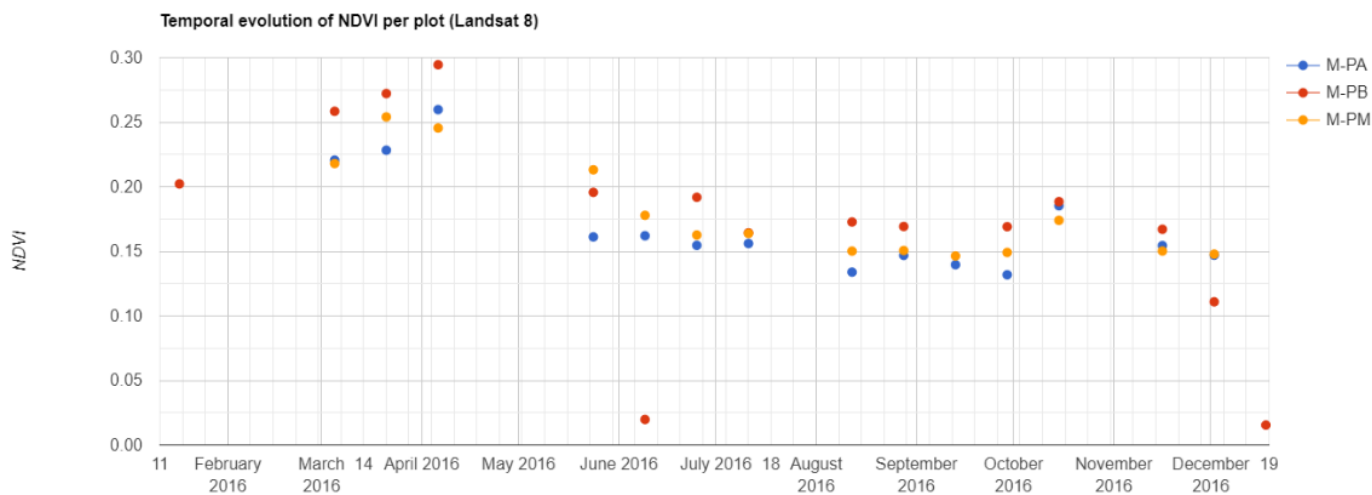
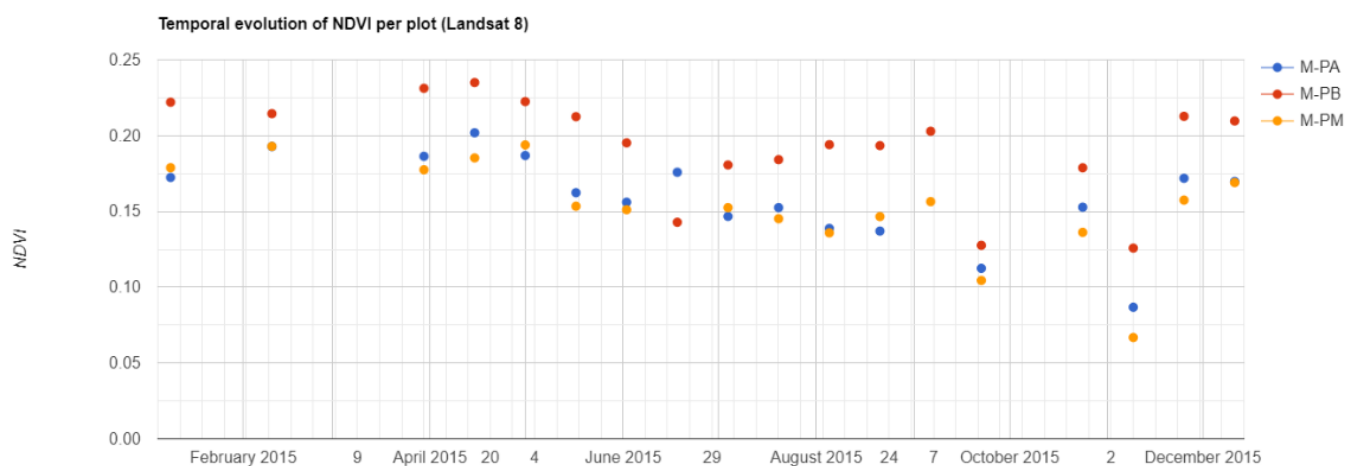
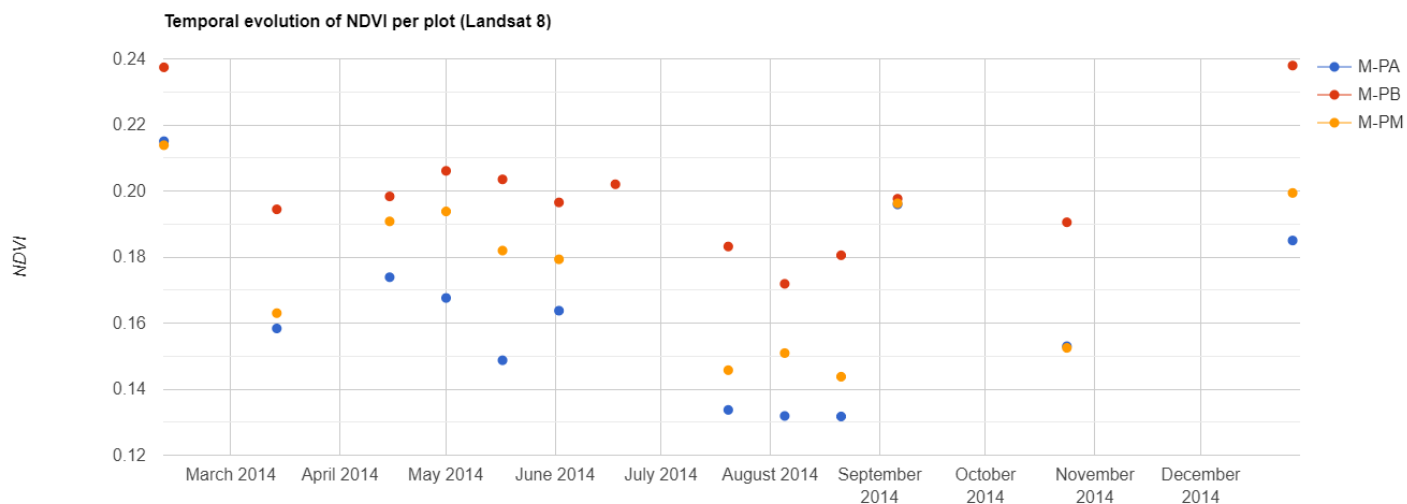
- Longares Aladrén, L.A. (2004). Variedad biogeográfica del territorio aragonés. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos. Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico. Zaragoza.*
- López Alados, C., Pueyo Estaún, Y. (2016). Papel de las interacciones planta-suelo en el mantenimiento de la productividad y la diversidad de ecosistemas pastorales.
- López Alados, C., Komac, B., Bueno, C., Gartzia, M., Escós, J., Gómez García, D., García-González, R., Fillat, F., Camarero, J.J., Herrero, J., Pueyo, Y. Modelización de la matorralización de los pastos del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y su relación con el cambio global. *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2007-2010.*
- Pueyo, Y., Alados, C., García-Ávila, B., Kéfi, S., Maestro, M., Rietkerk, M. (2009). Comparing Direct Abiotic Amelioration and Facilitation as Tools for Restoration of Semiarid Grasslands. *Rest.Ecol*, 17(6), 908-916.
- Zhang, X., Friedl, M., Schaaf, C., Strahler, A., Hodges, J., Gao, F., Bradley, C., Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471-475.

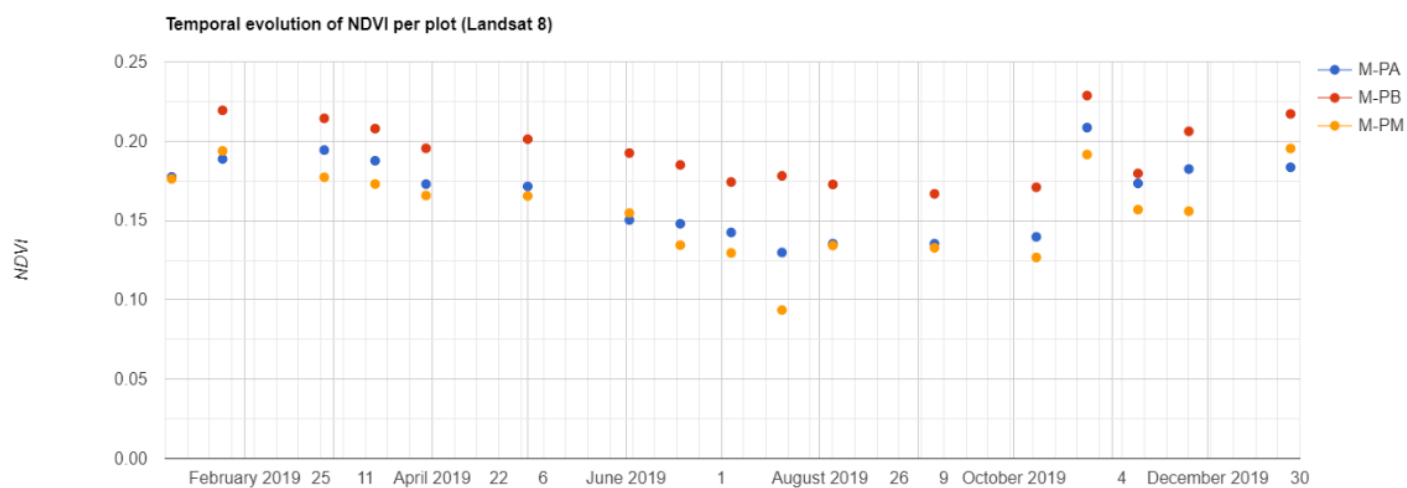
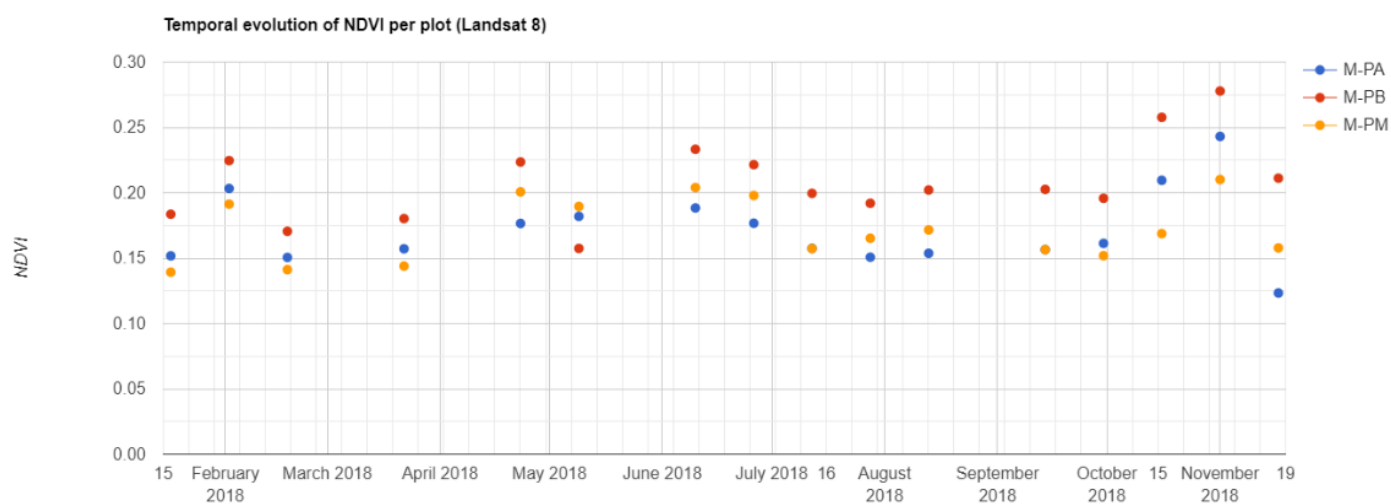
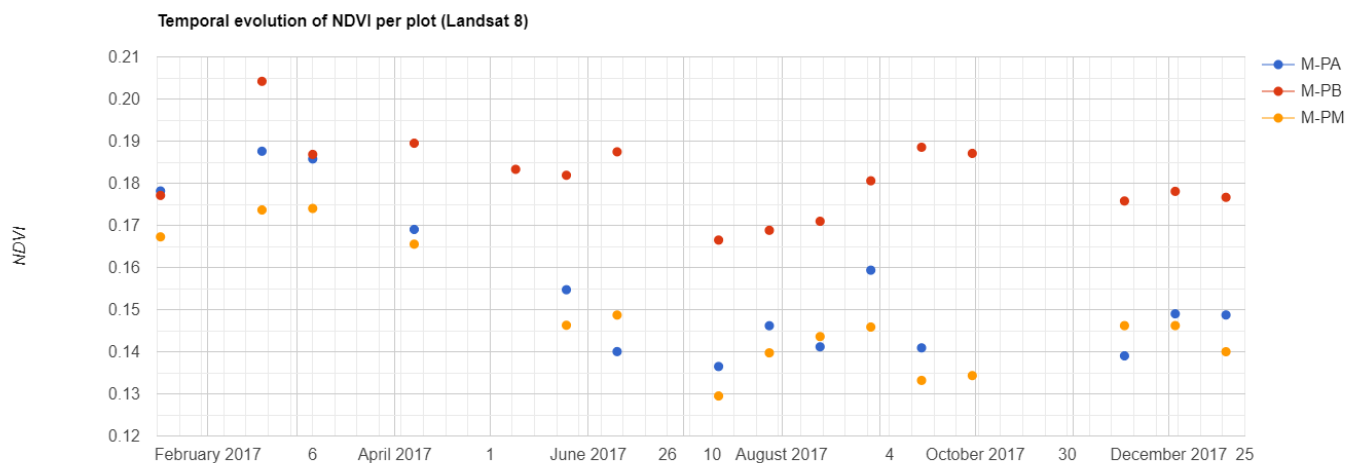
Páginas web

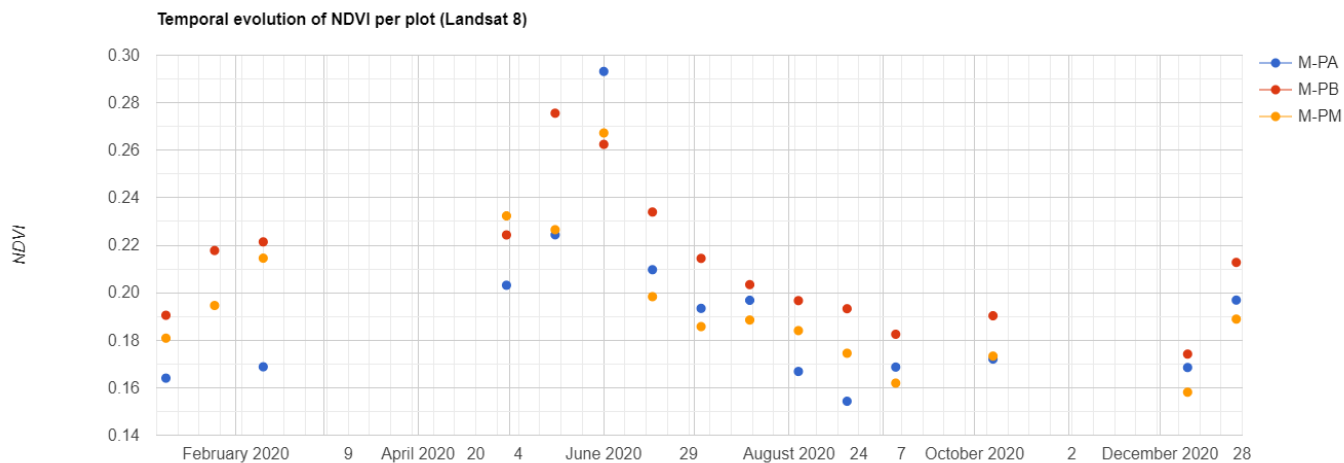
- Using the USGS Landsat 8 Products. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. URL: <http://landsat.usgs.gov/> . Consulta: octubre, 2021.
- Google Eart Engine. URL: <https://earthengine.google.com/>. Consulta: octubre, 2021.
- XLSTAT, URL: <https://www.xlstat.com/es/> Consulta: octubre, 2021.

6. Anexos: Gráficos del ciclo fenológico para los distintos sectores

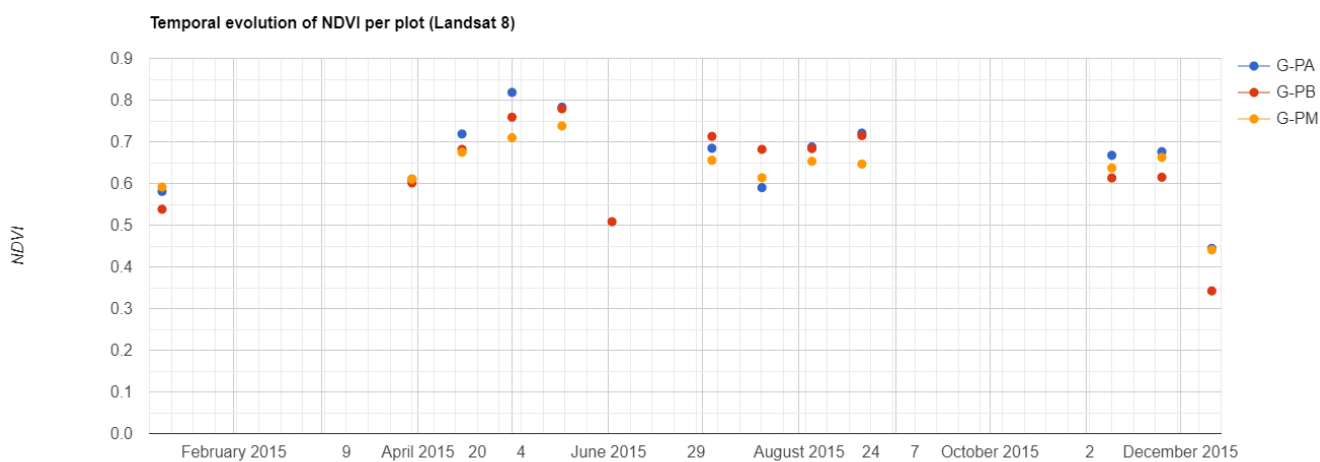
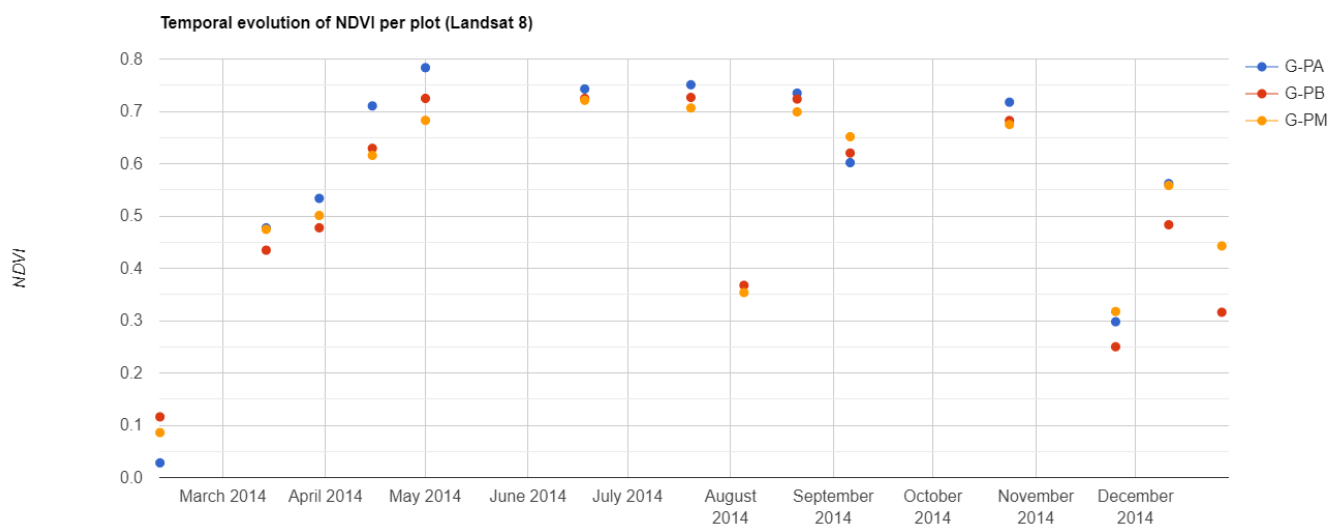
Ciclo Fenológico Anual en el Sector de Mediana para cada régimen de pastoreo: pastoreo alto (PA), pasto bajo (PB) y pastoreo medio (PM)

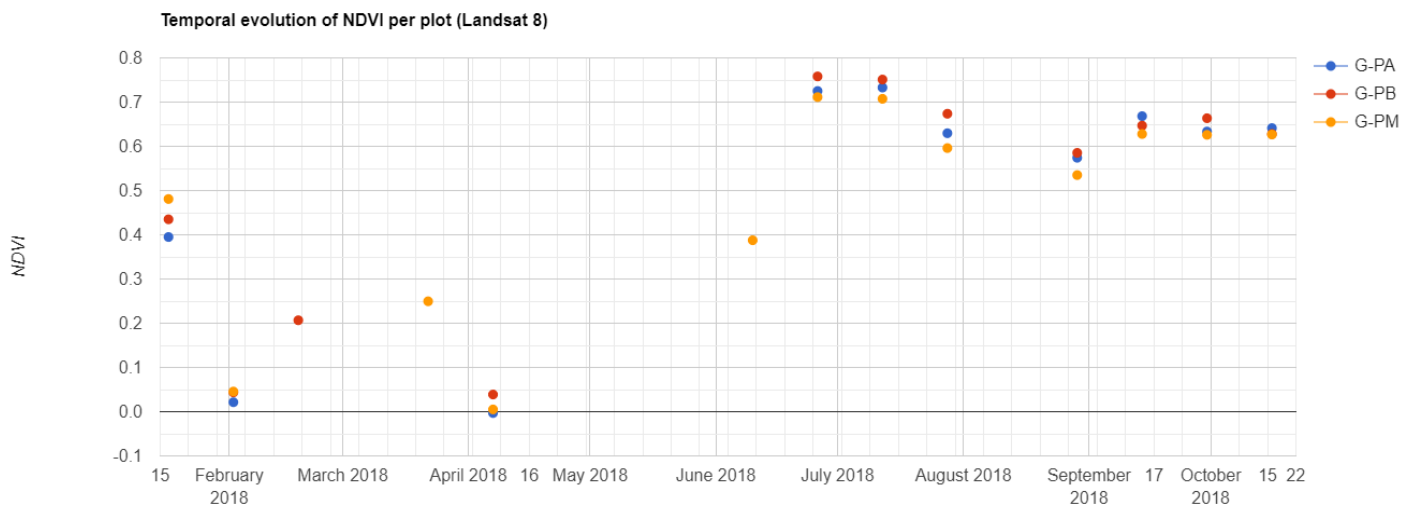
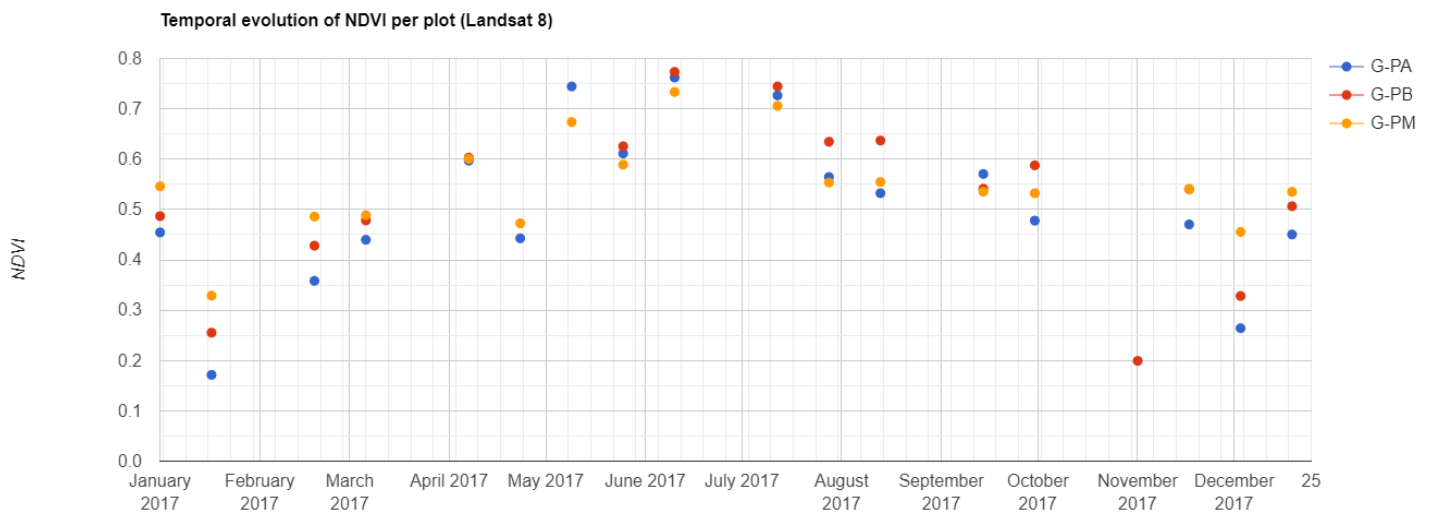
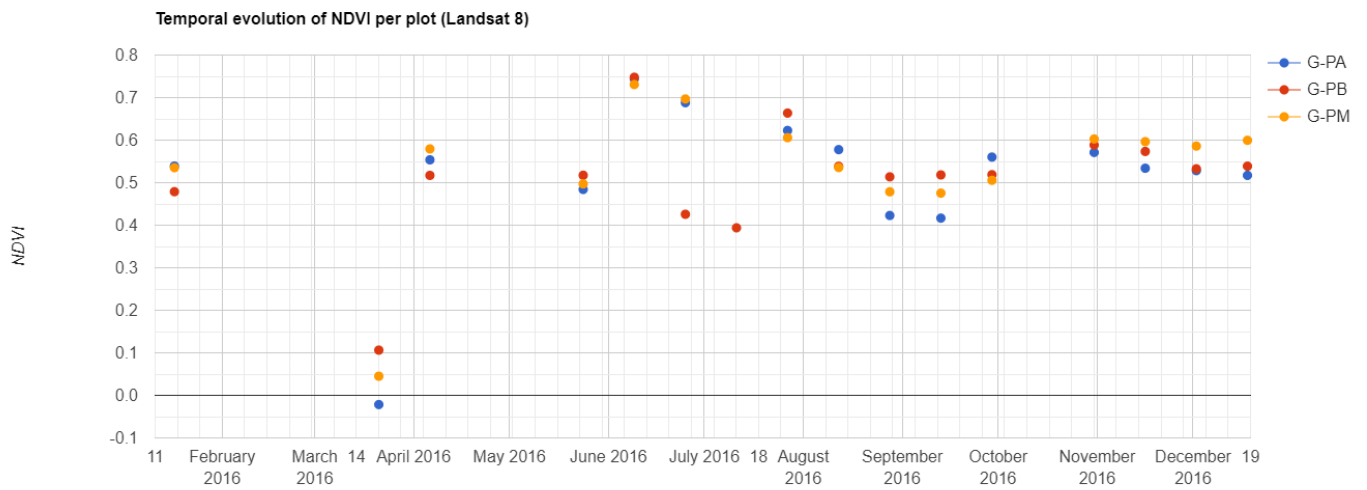


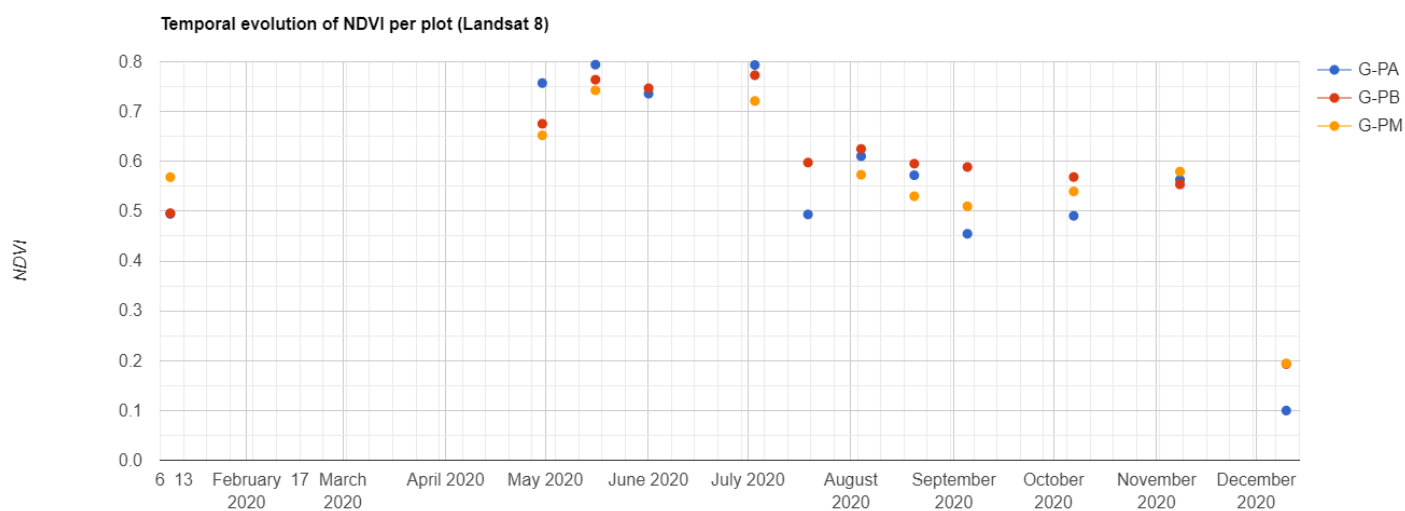
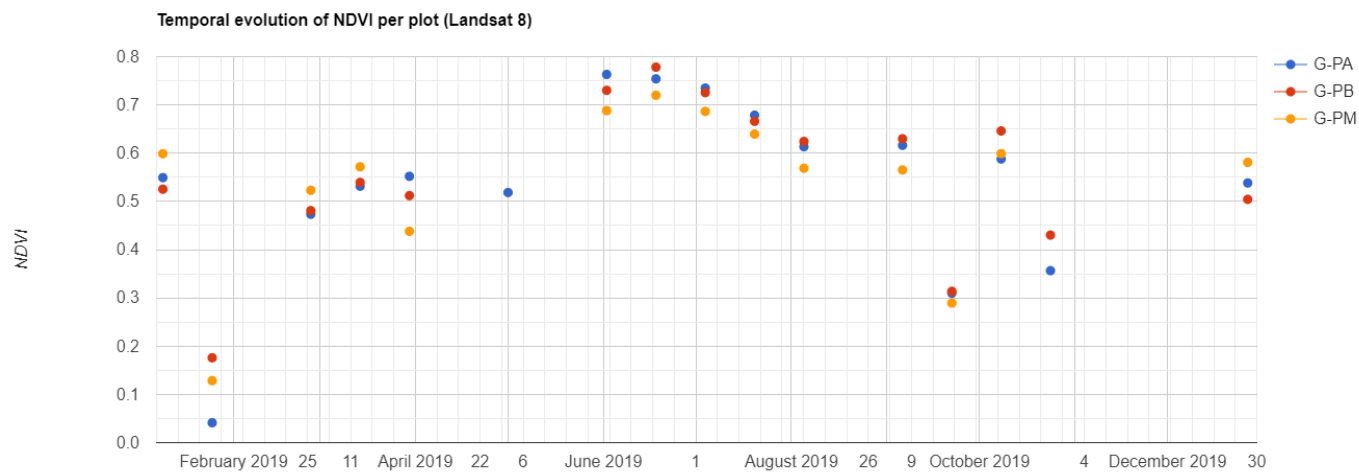




Ciclo Fenológico Anual en el Sector de Guara para cada régimen de pastoreo: pastoreo alto (PA), pasto bajo (PB) y pastoreo medio (PM)







Ciclo Fenológico Anual en el Sector de Pirineos para cada parcela

